

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

ESTUDIO DE FUERZAS AERODINÁMICAS SOBRE CUERPOS



Memoria y Anexos

Autor/a: Yassine el Metioui
Director/a: Alfred Fontanals Garcia
Convocatoria: Junio 2020

Resumen

En este trabajo de final de grado de Ingeniería Mecánica, se ha realizado el estudio del comportamiento del fluido que circula alrededor de una placa plana normal al flujo, con el fin de obtener los perfiles de velocidad y fuerzas que se generan durante el paso del fluido. El estudio consta de dos partes, una experimental y otra numérica.

Se han llevado a cabo medidas experimentales en un túnel de viento que ha sido facilitado por el departamento de Mecánica de Fluidos de la Escuela de Ingeniería de Barcelona Este, donde se han obtenido los perfiles de velocidad y fuerzas que el aire genera sobre el cuerpo.

También se han realizado varias simulaciones numéricas mediante la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), con el objetivo de obtener los perfiles y fuerzas del mismo cuerpo. Para ello se ha simulado una simplificación del túnel de viento junto con la geometría a estudiar en el programa ANSYS Fluent. Se han realizado estudios con diferentes mallas, velocidades y regímenes de flujo.

Por último, se han comparado ambos resultados, tanto los experimentales como los obtenidos por Dinámica de Fluidos Computacional.

Resum

En aquest treball de fi de grau d'Enginyeria Mecànica s'ha realitzat l'estudi del comportament d'un fluid al voltant d'una placa plana normal al flux amb el fi d'obtenir els perfils de velocitat i forces que es generen durant el pas del fluid. L'estudi consta de dos parts, una experimental i un altra numèrica.

S'han dut a terme mesures experimentals en un túnel de vent que ha estat facilitat per el departament de Mecànica de Fluids de l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est, on s'han obtingut els perfils de velocitat i les forces que l'aire exerceix sobre el cos.

També s'han realitzat varies simulacions numèriques mitjançant la Dinàmica de Fluids Computacional (CFD), amb l'objectiu d'obtenir els perfils i les forces del mateix cos. Per a això s'ha simulat una simplificació del túnel de vent junt amb la geometria a estudiar en el programa ANSYS Fluent. S'han realitzat estudis amb diferents malles, velocitats i règims de flux.

Per últim, s'han comparat ambdós resultats, tant els experimentals com els obtinguts mitjançant la Dinàmica de Fluids Computacional.

Abstract

In this final degree project of Mechanical Engineering, the study of the behaviour of a fluid around a flat plate normal to flow has been carried out in order to obtain the speed profiles and force that are generated during the course of the fluid. The study consists of two parts, one experimental and the other numerical.

Experimental measurements have been carried out in a wind tunnel that has been provided by the Fluid Mechanics department of the Barcelona East School of Engineering, where the profiles of speed and forces that the air generates on the body have been obtained.

Various numerical simulations have also been performed using Computational Fluid Dynamics (CFD), with the aim of obtaining the profiles and forces of the same body. For this, a simplification of the wind tunnel has been simulated together with the geometry in the ANSYS Fluent program. Studies have been carried out with different meshes, speeds and flow regimes.

Finally, both results have been compared, both experimental and those obtained by Computational Fluid Dynamics.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor, Alfred Fontanals Garcia, por haber tutorizado y revisado el proyecto desde el primer día. Me ha sabido guiar y aconsejar en todo momento y me ha enseñado nuevas referencias que han sido de gran ayuda para el proyecto.

Gracias a la universidad, Escuela de Ingeniería de Barcelona Este (EEBE), por haberme facilitado los medios necesarios para el desarrollo de este trabajo y el conocimiento para afrontar todas las adversidades.

Por último, pero no por ello menos importante, gracias a mi familia y amigos que han supuesto en todo momento un apoyo moral importante, ayudándome a superar los obstáculos a nivel psicológico que un proyecto de tal envergadura conlleva.

Glosario

| Dimensión | Símbolo | Unidad |
|-----------------------|-----------|--|
| Fuerza | F | [Newton] |
| Masa | m | [Kilogramo] |
| Aceleración | a | $\left[\frac{\text{Metro}}{\text{Segundo}^2} \right]$ |
| Presión | P | [Pascal] |
| Caudal volumétrico | \dot{V} | $\left[\frac{\text{Metro}^3}{\text{segundo}} \right]$ |
| Energía mecánica | E_m | [Joules] |
| Energía potencial | E_p | [Joules] |
| Energía cinética | E_c | [Joules] |
| Perdidas por fricción | h_f | [Joules] |
| Velocidad del fluido | c | $\left[\frac{\text{Metro}}{\text{Segundo}} \right]$ |
| Gravedad | g | $\left[\frac{\text{Metro}}{\text{Segundo}^2} \right]$ |
| Densidad | ρ | $\left[\frac{\text{Kilogramo}}{\text{Metro}^3} \right]$ |
| Altura | z | [Metro] |
| Número de Mach | M | Adimensional |
| Velocidad del fluido | V | $\left[\frac{\text{Metro}}{\text{Segundo}} \right]$ |
| Velocidad del sonido | V_s | $\left[\frac{\text{Metro}}{\text{Segundo}} \right]$ |
| Número de Reynolds | Re | Adimensional |
| Longitud | L | [Metro] |
| Viscosidad cinemática | ν | $\left[\frac{\text{Metro}^2}{\text{segundo}} \right]$ |
| Viscosidad dinámica | μ | [Pascales · Segundo] |
| Esfuerzo cortante | τ | $\left[\frac{\text{Newtons}}{\text{Metro}^2} \right]$ |

| | | |
|-----------------------------|-------|--|
| Velocidad de fricción | u | $\left[\frac{\text{Metro}}{\text{Segundo}} \right]$ |
| Distancia | y | [Metros] |
| Coeficiente de arrastre | C_D | Adimensional |
| Coeficiente de sustentación | C_L | Adimensional |
| Fuerza de arrastre | F_D | [Newton] |
| Fuerza de sustentación | F_L | [Newton] |
| Área | A | [Metros ²] |

Índice

| | |
|--|------------|
| RESUMEN | I |
| RESUM | II |
| ABSTRACT | III |
| AGRADECIMIENTOS | IV |
| GLOSARIO | V |
| 1. PREFACIO | 1 |
| 1.1. Origen del trabajo | 1 |
| 1.2. Motivación | 1 |
| 2. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 2.1. Objetivos del trabajo..... | 3 |
| 2.2. Alcance del trabajo | 3 |
| 3. FUNDAMIENTOS TEÓRICOS | 5 |
| 3.1. Aerodinámica | 5 |
| 3.2. Las 3 leyes de Newton | 5 |
| 3.3. Ley de conservación de la energía | 6 |
| 3.4. Principio de conservación de la masa..... | 6 |
| 3.4.1. Flujo incompresible | 8 |
| 3.5. Fluidos rotacionales e irrotacionales | 8 |
| 3.6. Ecuación de Bernoulli..... | 10 |
| 3.7. Número de Mach | 10 |
| 3.8. Número de Reynolds | 11 |
| 3.9. Tipos de Flujos | 12 |
| 3.10. Capa límite..... | 15 |
| 3.11. Presión en la capa limite | 17 |
| 3.12. Fuerzas sobre cuerpos | 18 |
| 3.13. Coeficientes adimensionales de fuerzas | 19 |
| 3.14. Fuerza de arrastre en una pared plana | 22 |
| 3.15. Modelo de turbulencia | 25 |
| 3.15.1. Modelo SST Turbulence..... | 25 |

| | |
|--|-----------|
| 4. FUNDAMENTOS EXPERIMENTALES | 26 |
| 4.1. Túnel de viento | 26 |
| 4.2. Principios de funcionamiento..... | 27 |
| 4.3. Partes de un túnel de viento | 27 |
| 4.4. Clasificación | 28 |
| 4.4.1. Tipo de ciclo | 28 |
| 4.4.2. Tipo de cámara de ensayo | 29 |
| 4.4.3. Impulso del aire..... | 30 |
| 4.4.4. Velocidad de ensayo | 30 |
| 4.5. Túnel de viento experimental | 31 |
| 4.6. Funcionamiento del túnel de viento | 32 |
| 4.6.1. Entrada | 32 |
| 4.6.2. Cámara de ensayo..... | 33 |
| 4.6.3. Salida | 34 |
| 4.7. Cuerpo a estudiar | 35 |
| 4.8. Procedimiento experimental..... | 36 |
| 4.8.1. Instalación del modelo a estudiar..... | 36 |
| 4.8.2. Procedimiento de medida del perfil de velocidad | 37 |
| 4.8.3. Procedimiento de medida de fuerzas..... | 37 |
| 4.9. Resultados experimentales | 38 |
| 4.9.1. Perfiles de Velocidad..... | 38 |
| 4.9.2. Fuerzas y coeficientes | 41 |
| 5. SIMULACIÓN DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) | 43 |
| 5.1. Introducción al ANSYS Fluent | 43 |
| 5.2. Creación de la geometría..... | 44 |
| 5.3. Creación de la malla..... | 45 |
| 5.4. Configuración del Setup | 50 |
| 5.5. Simulaciones a realizar | 56 |
| 5.6. Resultados CFD | 58 |
| 5.6.1. Geometría sin soportes..... | 58 |
| 5.6.2. Geometría con soportes | 67 |
| 5.6.3. Comparación de resultados | 77 |
| 6. RESULTADOS FINALES | 88 |
| CONCLUSIONES | 93 |

| | |
|---|------------|
| PRESUPUESTO Y ANÁLISIS ECONÓMICO | 96 |
| BIBLIOGRAFÍA | 98 |
| ANEXO A | 101 |
| A1. Tablas de velocidades | 101 |
| A2. Tabla de fuerzas y coeficientes | 107 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Volumen de Control [2]. _____ | 7 |
| Figura 2. Comportamiento de las partículas entre el flujo rotacional y el irrotacional [2]. _____ | 8 |
| Figura 3. Regiones de flujo rotacional e irrotacional [2]. _____ | 9 |
| Figura 4. Comportamiento de un fluido coloreado inyectado en un flujo [2]. _____ | 12 |
| Figura 5. Comportamiento de un flujo coloreado en la región transitoria [2]. _____ | 13 |
| Figura 6. Efecto de la superficie rugosa en el coeficiente de arrastre de una esfera [2]. _____ | 14 |
| Figura 7. Flujo alrededor de un perfil de ala [2]. _____ | 15 |
| Figura 8. Transición del flujo en la capa límite de una pared plana paralela al flujo [7]. _____ | 17 |
| Figura 9. Proceso de desprendimiento de la capa limite [2]. _____ | 17 |
| Figura 10. Presiones en una pared plana normal al flujo [2]. _____ | 18 |
| Figura 11. Fuerzas que actúan sobre un cuerpo sumergido en un fluido [22]. _____ | 18 |
| Figura 12. Coeficiente de arrastre para diferentes geometrías [21]. _____ | 20 |
| Figura 13. Coeficiente de arrastre promedio para diferentes geometrías según el número de Reynolds [16]. _____ | 21 |
| Figura 14. Coeficientes de arrastre C_D a bajas velocidades [2]. _____ | 22 |
| Figura 15. Coeficiente de arrastre de un disco plano normal al flujo según el número de Reynolds [2]. _____ | 23 |
| Figura 16. Coeficientes de arrastre C_D para varios cuerpos tridimensionales para $Re > 10^4$ [2]. ____ | 24 |

| | |
|---|----|
| Figura 17. Coeficientes de arrastre C_D para varias geometrías [10]. | 24 |
| Figura 18. Túnel de viento de Ferrari [19]. | 26 |
| Figura 19. Partes de un túnel de viento [19]. | 27 |
| Figura 20. Túnel de viento de ciclo abierto [6]. | 28 |
| Figura 21. Túnel de viento de ciclo cerrado [15]. | 28 |
| Figura 22. Ilustración de un túnel de viento de sección abierta [17]. | 29 |
| Figura 23. Ilustración de un túnel de viento de sección cerrada [17]. | 29 |
| Figura 24. Ilustración de la forma del túnel de viento según la velocidad de ensayo [1]. | 30 |
| Figura 25. Túnel de viento del laboratorio de la universidad EEBE [6]. | 31 |
| Figura 26. Tobera [6]. | 32 |
| Figura 27. Cámara de ensayo. | 32 |
| Figura 28. Componentes de la cámara de ensayo [4]. | 33 |
| Figura 29. Sistema de control y medida [4]. | 34 |
| Figura 30. Componentes de salida del túnel de viento [5]. | 35 |
| Figura 31. Geometrías disponibles del túnel de viento [5]. | 35 |
| Figura 32. Perfiles de velocidad experimentales a 10 m/s | 39 |
| Figura 33. Perfiles de velocidad experimentales a 20 m/s | 39 |
| Figura 34. Perfiles de velocidad experimentales a 30 m/s | 40 |
| Figura 35. Fuerzas total y fuerzas sobre la placa plana y el cilindro dummy a 30 m/s. | 41 |

| | |
|---|----|
| Figura 36. Comparación del coeficiente de arrastre experimental con el de la bibliografía vs Número de Reynolds. | 42 |
| Figura 37. Panel de control del “Workbench” | 43 |
| Figura 38. Geometría sin soportes. | 44 |
| Figura 39. Geometría con soportes y barra dummy | 45 |
| Figura 40. Etiquetas en la geometría (1) | 45 |
| Figura 41. Etiquetas en la geometría (2) | 46 |
| Figura 42. Mallado de la geometría. | 46 |
| Figura 43. “Inflation” en la geometría sin soportes. | 47 |
| Figura 44. “Inflation” en la geometría con soportes y barra dummy. | 47 |
| Figura 45. Apartado “General” | 50 |
| Figura 46. Apartado “Models” y modelo seleccionado. | 50 |
| Figura 47. Fluido seleccionado y propiedades. | 51 |
| Figura 48. “Cell Zone Conditions” | 51 |
| Figura 49. “Boundary Conditions” | 52 |
| Figura 50. “Reference Values” | 53 |
| Figura 51. “Solution Methods” | 53 |
| Figura 52. “Solution Initialization” | 54 |
| Figura 53. “Run Calculation” en el estado estacionario. | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 54. “Run Calculation” estado transitorio. | 55 |
| Figura 55. Perfil de velocidades aguas arriba de la malla 4 de la geometría sin soportes. | 58 |
| Figura 56. Perfil de velocidades aguas abajo de la malla 4 de la geometría sin soportes. | 59 |
| Figura 57. Gráfico de convergencia del coeficiente de arrastre C_d en régimen estacionario | 60 |
| Figura 58. Gráfico de convergencia del coeficiente de arrastre C_d en régimen transitorio (0,01s) | 60 |
| Figura 59. Contornos de presión (Pa) de la geometría sin soportes. | 61 |
| Figura 60. Contornos de velocidad (m/s), de la geometría sin soportes. | 62 |
| Figura 61. Contornos de velocidades (m/s), alrededor de la placa plana. | 63 |
| Figura 62. Región separa y estela formada por la placa plana. | 64 |
| Figura 63. Vectores de velocidad (m/s), de la geometría sin soportes. | 64 |
| Figura 64. Vectores de velocidad (m/s), de la parte posterior de la placa sin soportes. | 65 |
| Figura 65. Contornos de intensidad de turbulencia (%), de la geometría sin soportes. | 66 |
| Figura 66. Perfil de velocidades aguas arriba de la malla 4 de la geometría con soportes. | 67 |
| Figura 67. Perfil de velocidades aguas abajo de la malla 4 de la geometría con soportes. | 67 |
| Figura 68. Contornos de presión (Pa) del a geometría con soportes, en el eje Z. | 69 |
| Figura 69. Contornos de presión (Pa) de la geometría con soportes, en el eje Y. | 69 |
| Figura 70. Contornos de velocidad (m/s), de la geometría con soportes en el eje Z. | 70 |
| Figura 71. Contornos de velocidad (m/s), de la geometría con soportes en el eje Y. | 71 |
| Figura 72 Capa límite del soporte. | 72 |

| | |
|---|----|
| Figura 73. Vectores de velocidad (m/s), de la geometría con soportes en el plano Z. _____ | 72 |
| Figura 74. Vórtices generados en la geometría con soportes. _____ | 73 |
| Figura 75. Vectores de velocidad (m/s), de la geometría con soportes en el plano Y. _____ | 74 |
| Figura 76. Vectores de velocidad (m/s) en el soporte. _____ | 74 |
| Figura 77. Contornos de intensidad de turbulencia (%), de la geometría con soportes en el plano Z. | 75 |
| Figura 78. Contornos de intensidad de turbulencia (%), de la geometría con soportes en el plano Y. | 76 |
| Figura 79. Gráfico de convergencia de la fuerza y el C_D . _____ | 78 |
| Figura 80. Perfiles de velocidad aguas arriba de las diferentes mallas de la geometría sin soportes. | 79 |
| Figura 81. Perfiles de velocidad aguas abajo de las diferentes mallas de la geometría sin soportes. | 79 |
| Figura 82. Gráfico de convergencia de la fuerza y el C_D . _____ | 82 |
| Figura 83. Perfiles de velocidad aguas arriba de las diferentes mallas de la geometría con soportes. | 82 |
| Figura 84. Perfiles de velocidad aguas abajo de las diferentes mallas de la geometría con soportes. | 83 |
| Figura 85. Gráfico fuerza vs velocidad. _____ | 85 |
| Figura 86. Comparación del coeficiente de arrastre CFD con el de la bibliografía vs Número de Reynolds. _____ | 85 |
| Figura 87. Perfiles de velocidad aguas arriba a varias velocidades. _____ | 86 |
| Figura 88. Perfiles de velocidad aguas abajo a varias velocidades. _____ | 87 |
| Figura 89. Comparación de los perfiles aguas arriba experimentales y computacionales a diferentes velocidades. _____ | 88 |

| | |
|--|----|
| Figura 90. Comparación de los perfiles aguas abajo experimentales y computacionales a diferentes velocidades. | 89 |
| Figura 91. Comparación de las fuerzas obtenidas experimentalmente y por CFD. | 90 |
| Figura 92. Comparación del coeficiente de arrastre. | 91 |
| Figura C. 1. Imperfecciones en el panel de abeja | 94 |

Índice de Tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Condiciones de ensayo. _____ | 38 |
| Tabla 2. Tamaño de malla de las diferentes partes de la geometría sin soportes. _____ | 48 |
| Tabla 3. Tamaño de malla y saltos de tiempo para las simulaciones en estado transitorio de la geometría sin soportes. _____ | 48 |
| Tabla 4. Tamaño de malla de las diferentes partes de la geometría con soportes. _____ | 49 |
| Tabla 5. Tamaño de malla y saltos de tiempo para las simulaciones en estado transitorio de la geometría con soportes. _____ | 49 |
| Tabla 6. Velocidades de ensayo para las diferentes simulaciones. _____ | 56 |
| Tabla 7. Fuerzas y coeficientes de arrastre de la geometría con soportes. _____ | 68 |
| Tabla 8. Resultados de fuerzas y coeficientes de arrastre de la geometría sin soportes en régimen estacionario. _____ | 77 |
| Tabla 9. Resultados de fuerzas y coeficientes de arrastre de la geometría sin soportes en régimen transitorio. _____ | 77 |
| Tabla 10. Resultados de fuerzas y coeficientes de arrastre de la geometría con soportes en régimen estacionario. _____ | 81 |
| Tabla 11. Resultados de fuerzas y coeficientes de arrastre de la geometría con soportes en régimen transitorio. _____ | 81 |
| Tabla 12. Resultados de las simulaciones a diferentes velocidades. _____ | 84 |
| Tabla C. 1. Resultados de fuerzas y coeficientes de arrastre a 30 m/s. _____ | 93 |
| Tabla A. 1. Velocidades aguas arriba y aguas abajo a 10 m/s _____ | 102 |
| Tabla A. 2. Velocidades aguas arriba y aguas abajo a 20 m/s _____ | 104 |

Tabla A. 3. Velocidades aguas arriba y aguas abajo a 30 m/s _____ 106

Tabla A. 4. Fuerzas resultantes para la placa plana y el cilindro dummy. _____ 107

Tabla A. 5. Coeficientes de arrastre resultantes para la placa y el cilindro dummy. _____ 107

1. PREFACIO

1.1. Origen del trabajo

Este trabajo esta encarado al campo del análisis de flujos. Esta área esta en continuo desarrollo en todos los campos que abarca, tanto a nivel computacional, donde se desarrolla constantemente nuevo software de estudio, como a nivel experimental, donde se desarrollan y optimizan nuevos modelos.

Cada vez más entidades incorporan estudios de flujo en sus proyectos, ya sea computacional o experimental, como podría ser en las grandes automovilísticas como BMW o Ferrari que disponen de túneles de viento a gran escala para optimizar la aerodinámica de sus coches.

El origen de este trabajo viene dado por realizar un estudio aerodinámico de un cuerpo a pequeña escala, pero con los mismos conceptos teóricos y experimentales.

1.2. Motivación

La motivación para realizar este trabajo surge del interés que me genera la mecánica de fluidos y todo lo que la envuelve. Durante el transcurso del grado se abarcan varias ramas de la ingeniería mecánica, pero la que más me cautivo fue la de Ingeniería de Fluidos. En esta asignatura, se llevan a cabo varios experimentos, entre ellos uno con un túnel de viento. Este experimento no profundizaba mucho en el ámbito, sin embargo, me cautivo y despertó interés en mí y decidí realizar un trabajo de fin de grado encarado hacía ese tema para aprender y profundizar en él.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Objetivos del trabajo

El objetivo de este proyecto es estudiar el comportamiento aerodinámico de una placa plana normal al flujo en un túnel de viento. Se determinarán las fuerzas que actúan sobre el cuerpo y los perfiles de velocidad del flujo. Se realizarán estudios experimentalmente mediante un túnel de viento propiedad de la universidad y computacionalmente mediante un software de Dinámica de Fluidos Computacional. Finalmente se compararán ambos resultados obtenidos.

2.2. Alcance del trabajo

En este proyecto se expone la teoría fundamental para poder comprender la totalidad del trabajo, tanto a nivel conceptual como a nivel práctico. También se exponen los valores bibliográficos que nos han servido de guía para así poder validar y contrastar los resultados obtenidos en las diferentes pruebas.

Con los datos obtenidos, se han generado tablas y gráficos para presentar de manera clara y concisa los resultados. En la parte de CFD también se han presentado ilustraciones directas de los resultados obtenidos.

3. FUNDAMIENTOS TEÓRICOS

En este apartado se resumen todos los conceptos y conocimientos básicos de mecánica de fluidos necesarios para poder comprender de forma clara y concisa el abasto y desarrollo de este Trabajo de Final de Grado.

3.1. Aerodinámica

La aerodinámica es una rama de la mecánica de fluidos que estudia las acciones que ocurren sobre los cuerpos sólidos cuando existe un movimiento relativo entre estos y el fluido que les rodea, siendo este un gas.

El problema de la aerodinámica consiste en determinar los diferentes tipos de fuerzas que el fluido realiza sobre el cuerpo.

3.2. Las 3 leyes de Newton

La aerodinámica se desarrolla a partir de las ecuaciones de Newton. Las leyes de Newton son tres principios a partir de los cuales se describe una gran parte de los problemas de la mecánica clásica relacionados con el movimiento de cuerpos. Estas leyes dicen lo siguiente:

1ª Ley de Newton: si sobre un cuerpo no actúa ningún otro cuerpo o fuerza, este permanecerá indefinidamente moviéndose en línea recta con velocidad constante (incluido el estado de reposo, que equivale a velocidad cero).

2ª Ley de Newton: dice que la fuerza neta aplicada sobre un cuerpo es proporcional a la aceleración que adquiere dicho cuerpo. La constante de proporcionalidad es la masa del cuerpo, de manera que podemos expresar la relación de la siguiente forma:

$$F = m \cdot a$$

(Ec. 3.1)

3ª Ley de Newton: también conocida popularmente como Principio de acción y reacción. Nos dice que, si un cuerpo A ejerce una acción sobre otro cuerpo B, éste realiza sobre A otra acción igual y de sentido contrario.

3.3. Ley de conservación de la energía

La ley de la conservación de la energía, afirma que la cantidad total de energía de cualquier sistema físico aislado, sin interacción con ningún otro sistema, permanecerá invariable en el tiempo, aunque dicha energía pueda transformarse en otra forma de energía.

Esto se resume en el principio de que **la energía no puede ni crearse ni destruirse** en el universo, únicamente transformarse en otras formas de energía.

3.4. Principio de conservación de la masa

La ley de Lavoisier o ley de la conservación de la masa dice que la masa no se crea ni se destruye, solo se transforma.

Todas las leyes de la mecánica están definidas para sistemas que se definen como cantidades arbitrarias de masa de cantidad fija. Se considera el entorno a todo lo externo y que está separado por su frontera o contorno. Este sistema es una cantidad fija de masa, de ahí la conservación de la masa.

La ecuación de continuidad no es más que un caso particular del principio de conservación de la masa. Se basa en que el caudal del fluido ha de permanecer constante a lo largo de toda la conducción.

En la mecánica de fluidos se utiliza el concepto de **Volumen de Control** definido como un espacio arbitrario que se elige con el objeto de estudio. Formado por el espacio delimitado por una superficie de control (SC) cerrada, real o virtualmente, donde una de sus características, en general, será la permanencia de la forma y el tamaño del volumen así delimitado. La permanencia del espacio ocupado por el volumen de control hace que las partículas que lo ocupan no sean siempre las mismas.

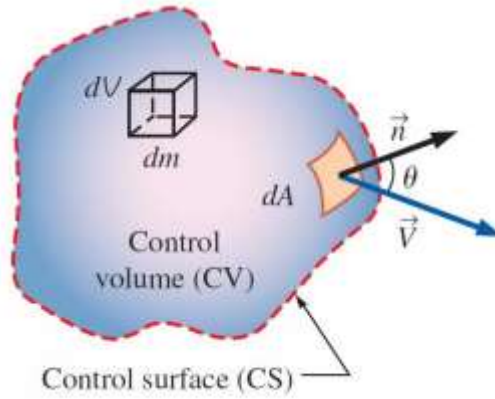


Figura 1. Volumen de Control [2].

Por lo tanto, la ecuación de la continuidad definida para un volumen de control puede ser expresada como: “La transferencia neta de masa desde o hacia un volumen de control durante un intervalo de tiempo Δt es igual al cambio neto de masa total dentro del volumen de control durante Δt .” Esto queda expresado en (Ec. 3.2).

$$m_{entra} - m_{sale} = \Delta m_{VC}$$

(Ec. 3.2)

Donde $\Delta m_{VC} = m_{final} - m_{inicial}$ es el cambio en la masa del volumen de control durante el proceso.

Expresando las ecuaciones en unidad de tiempo y considerando la masa total dentro del volumen, el principio de conservación de la masa podría re escribirse como se muestra en (Ec. 3.3):

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0$$

(Ec. 3.3)

3.4.1. Flujo incompresible

En la mecánica de fluidos se clasifican los flujos en compresibles e incompresibles. Aquellos flujos donde las variaciones en la densidad son insignificantes se denominan incompresibles. Cuando las variaciones en la densidad dentro de un flujo no se pueden despreciar, estos se llaman compresibles.

En resumen, la compresibilidad se da si la densidad del fluido varía o no a lo largo de todo un flujo. Un buen ejemplo es el aire (fluido de uso en nuestros ensayos), cuya densidad varía dependiendo de la temperatura.

Para los flujos incompresibles, al no haber variación de densidad, la ecuación de continuidad puede expresarse como se muestra (Ec. 3.4):

$$\sum_{\text{entrada}} \dot{V} = \sum_{\text{salida}} \dot{V}$$

(Ec. 3.4)

3.5. Fluidos rotacionales e irrotacionales

Cuando se tiene un fluido que se desplaza en una corriente circular, pero las partículas del fluido no giran alrededor del eje que pasa por su centro de masas, se dice que el flujo es irrotacional. En caso contrario estamos ante un flujo rotacional.

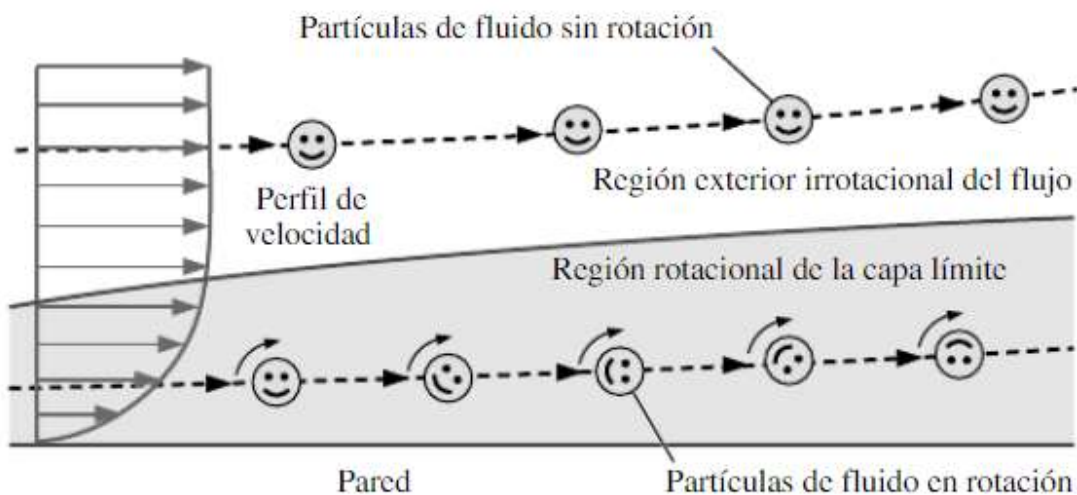


Figura 2. Comportamiento de las partículas entre el flujo rotacional y el irrotacional [2].

En este apartado, entra en juego otro concepto importante relacionado con la irracionalidad del fluido, llamada vorticidad. La vorticidad es debida a las tensiones tangenciales presentes en el flujo que se originan en los contornos sólidos donde el fluido ha de verificar la condición de no deslizamiento y se propaga después siguiendo una ley de la difusión.

La vorticidad es una medida de la rotación de una partícula de fluido. Específicamente, *la **Vorticidad** es igual al doble de la velocidad angular de una partícula de fluido.*

Si la vorticidad en un punto en un campo de flujo es diferente de cero, la partícula de fluido que llegue a ocupar ese punto en el espacio está girando; se dice que el flujo en esa región es rotacional. De modo semejante, si la vorticidad en una región del flujo es igual a cero las partículas del fluido allí no están girando; se dice que el flujo en esa región es irrotacional.

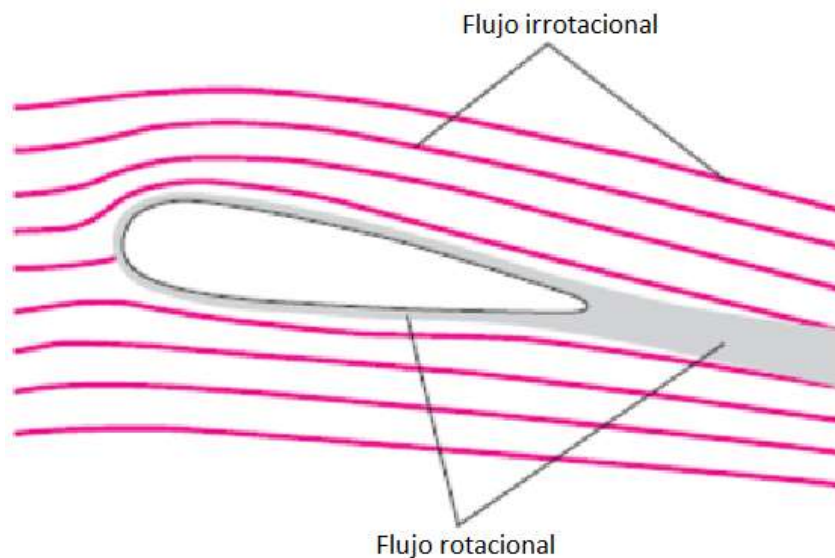


Figura 3. Regiones de flujo rotacional e irrotacional [2].

3.6. Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli es una relación aproximada entre la presión, la velocidad y la altura, y es válida en regiones de flujo estacionario e incompresible en donde las fuerzas netas de fricción son despreciables. Ese tipo de regiones se presentan por fuera de las capas límite y de las estelas.

La forma más común de expresar la ecuación de Bernoulli (Ec. 3.7):

$$\Delta E_{m1} = \Delta E_{m2} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

$$E_{c1} + E_{p1} = E_{c2} + E_{p2} + h_f \quad (\text{Ec. 3.6})$$

$$\frac{c_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 = \frac{c_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + h_f \quad (\text{Ec. 3.7})$$

3.7. Número de Mach

El número de Mach (M) es la relación existente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas originadas por la compresibilidad del fluido. Es un término normalmente utilizado para tratar el movimiento de los fluidos sobre los objetos. El número de Mach se expresa según la (Ec. 3.8):

$$M = \frac{V}{V_s} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Donde:

V = velocidad del fluido

V_s = velocidad del sonido

Este número ofrece una muy útil información respecto el comportamiento del cuerpo, por lo que se puede desglosar y clasificar el medio en diferentes tipos:

Subsónico: $M < 0,7$

Transónico: $0,7 < M < 1,2$

Supersónico: $1,2 < M < 5$

Hipersónico: $M > 5$

En el uso de estudios aerodinámicos, el número de Mach es muy útil a la hora de afrontar el problema. El cociente entre las dos velocidades ofrece información sobre la compresibilidad del gas. Para valores menores de 0,3 ($M < 0,3$) el gas se puede expresar como un gas incompresible, hecho que simplifica los cálculos a realizar por simulación computacional.

3.8. Número de Reynolds

El número de Reynolds es la relación que existe entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas existentes en un fluido sujetas a su movimiento interno debido a las diferentes velocidades del mismo fluido. El Reynolds se expresa para un flujo como (Ec. 3.9):

$$Re = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{V_{prom} \cdot L}{\nu} = \frac{\rho \cdot V_{prom} \cdot L}{\mu}$$

(Ec. 3.9)

Donde:

V_{prom} = Velocidad de flujo promedio [m/s]

L = longitud característica de la geometría (el diámetro en el caso de conductos circulares) [m]

$\nu = \mu/\rho$ = viscosidad cinemática del fluido [m^2/s]

Hay que tener en cuenta que el número de Reynolds es una cantidad adimensional. Además, la viscosidad cinemática tiene la unidad m^2/s y se puede ver como *difusividad viscosa o difusividad de cantidad de movimiento*.

3.9. Tipos de Flujos

El número de Reynolds se utiliza para pronosticar la conducta del fluido durante su estudio. Esto es debido a que, según el valor estimado de este número, podemos predecir el comportamiento del flujo.

A números de Reynolds pequeños o moderados, las fuerzas viscosas son lo suficientemente grandes como para suprimir dichas fluctuaciones y mantener el fluido “en línea”. Sin embargo, a números grandes de Reynolds, las fuerzas inerciales, que son proporcionales a la densidad del fluido y al cuadrado de la velocidad del fluido, son grandes en relación con las fuerzas viscosas y por lo tanto las fuerzas viscosas no pueden evitar las aleatorias y rápidas fluctuaciones del fluido. Por lo tanto, el flujo es laminar en el primer caso y turbulento en el segundo caso (Figura 4).

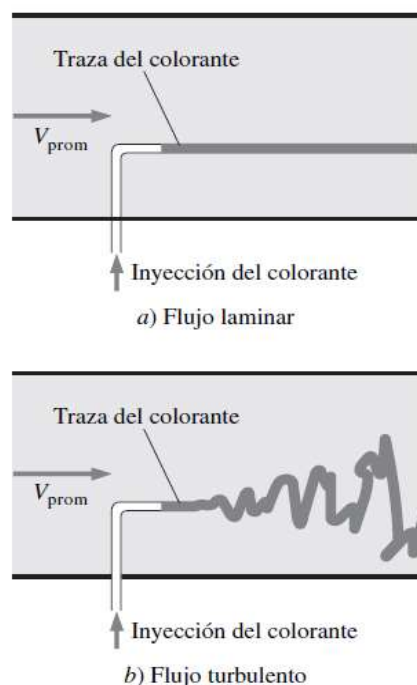


Figura 4. Comportamiento de un fluido coloreado inyectado en un flujo [2].

Es deseable tener valores precisos de números de Reynolds para flujos laminares, transicionales y turbulentos, pero éste no es el caso en la práctica. Es evidente que la transición del flujo laminar a turbulento también depende del grado de perturbación del flujo por la rugosidad de la superficie, las vibraciones de la tubería y las fluctuaciones en el flujo. En la mayoría de las condiciones prácticas el flujo interno en una **tubería circular** se clasifica:

Laminar: para valores de $Re < 2300$. Este flujo se caracteriza por moverse en placas planas paralelas unas con otras siguiendo una trayectoria suave.

Turbulento: para valores de $Re > 4000$. Este flujo se caracteriza por presentar una forma desordenada y enredada generando así vórtices en el fluido, obstaculizando el paso de sí mismo. Se puede aproximar su comportamiento, pero debido a dicho desorden, siempre existe la duda de saber con precisión cómo se comportará.

Transitorio: para valores de $2300 \leq Re \leq 4000$. En el flujo transicional, el flujo cambia entre laminar y turbulento de manera aleatoria. Este hecho nos ofrece una incertidumbre respecto a que comportamiento adoptará.

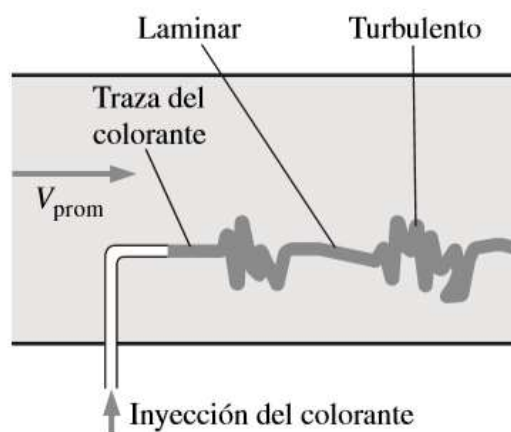


Figura 5. Comportamiento de un flujo coloreado en la región transitoria [2].

Como se ha comentado anteriormente, la transición de flujo laminar a turbulento depende de la geometría, la rugosidad de la superficie, la velocidad del flujo, la temperatura de la superficie y el tipo de fluido, entre otros factores.

En la Figura 6 se puede ver un gráfico del coeficiente de arrastre frente al Reynolds de una esfera. En las diferentes líneas se puede observar como hay un punto donde descienden bruscamente, ese punto es cuando el flujo pasa de ser laminar a un estado transitorio y posteriormente a turbulento. En el caso de una esfera lisa por valores de $Re < 2 \times 10^5$ se trata de un flujo laminar. Para valores de $2 \times 10^5 < Re < 2 \times 10^6$ se trata de un flujo transitorio y para valores de $Re > 2 \times 10^6$ es turbulento.

También se puede observar como dependiendo de la rugosidad de la esfera, este punto de transición varía. Por lo tanto, como mayor sea la rugosidad, más bajo es el punto de transición llegando hasta una pelota de golf (esfera con hoyuelos) donde el punto de transición es para valores de Reynolds de aproximadamente 4×10^4 .

Hay que tener cuidado con este factor, ya que, si no se trabaja con el rango de número de Reynolds adecuado, el coeficiente de arrastre puede aumentar considerablemente. En la misma figura, podemos observar como para Reynolds altos de 4×10^6 el coeficiente de arrastre de una esfera lisa es de alrededor

de 0,2, en cambio para los cuerpos rugosos es de alrededor de 0,4. Estos valores son totalmente contrarios a los que ocurren en el rango de 4×10^4 hasta 3×10^5 donde los cuerpos rugosos tienen menor coeficiente (Figura 6).

Por lo tanto, se puede ver claramente como la geometría o la rugosidad influyen directamente en el estado del flujo, entre otros factores.

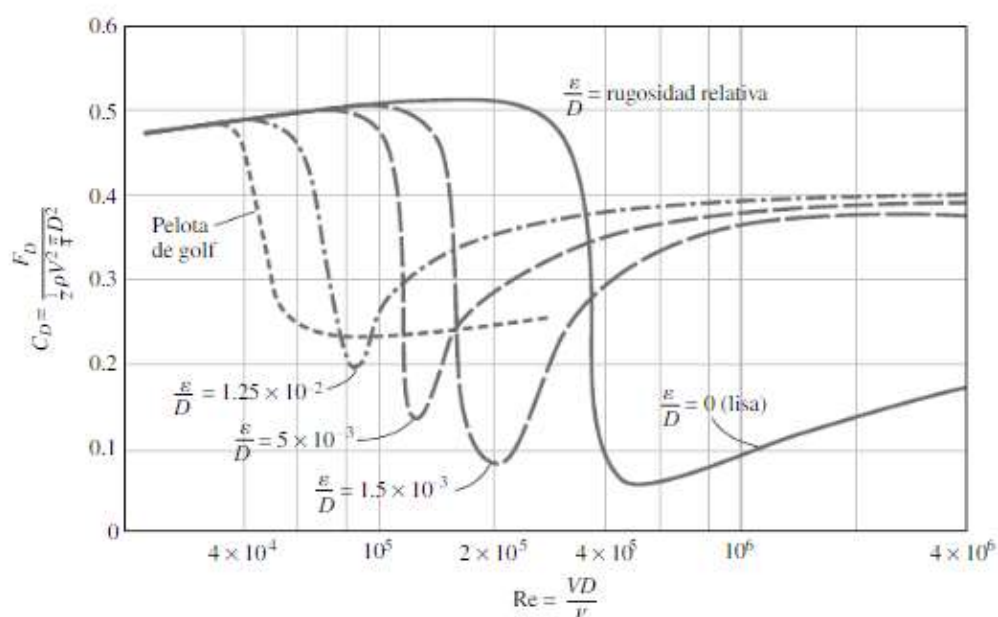


Figura 6. Efecto de la superficie rugosa en el coeficiente de arrastre de una esfera [2].

3.10. Capa límite

El flujo de fluidos con frecuencia se encuentra limitado por superficies sólidas y resulta importante entender de qué manera la presencia de estas superficies afecta el flujo.

Considérese el flujo de un fluido en un tubo estacionario o sobre una superficie sólida que es no porosa. Todas las observaciones experimentales indican que un fluido en movimiento llega a detenerse por completo en la superficie y adquiere una velocidad cero con relación a ella. Esto significa que, un fluido en contacto directo con un sólido “se pega” a la superficie debido a los efectos viscosos y no hay deslizamiento. A esta característica se le conoce como la condición de no-deslizamiento.

La capa que se pega a la superficie del sólido desacelera la capa adyacente del fluido, debido a las fuerzas viscosas en las capas del fluido, la cual desacelera a la siguiente capa y así sucesivamente. Por lo tanto, la condición de no-deslizamiento es la responsable del desarrollo del perfil de velocidades. La región del fluido cercano a la pared, en la cual los efectos viscosos son significativos, se llama **capa límite**.

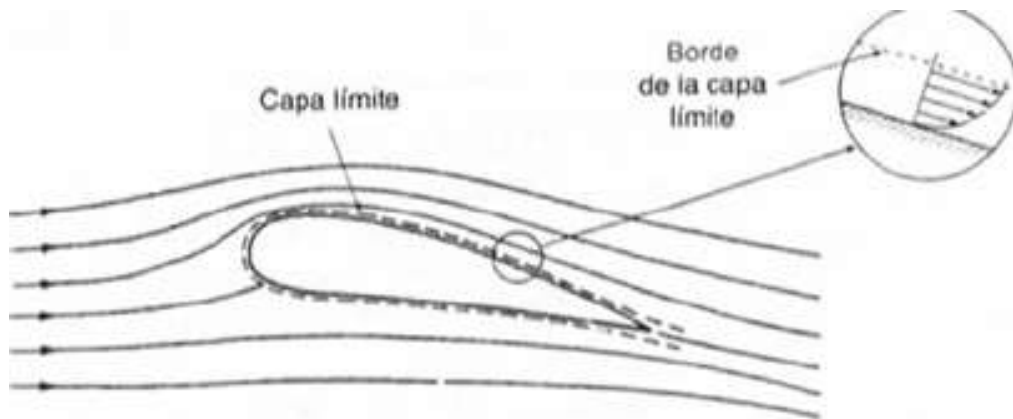


Figura 7. Flujo alrededor de un perfil de ala [2].

Esta fuerza que frena el fluido en contacto con la superficie, se trata de un esfuerzo tangencial cortante a la dirección del flujo. A medida que el flujo se va alejando del sólido, este va incrementando su velocidad hasta establecerse en su total normalidad. El valor del esfuerzo cortante se puede expresar con la (Ec. 3.10):

$$\tau = \mu \frac{u}{y}$$

(Ec. 3.10)

Donde:

μ = coeficiente de viscosidad [kg/m·s]

u = velocidad [m/s]

y = distancia de la velocidad a la pared [m]

El comportamiento de esta capa límite varía según si el flujo es laminar o turbulento. En la Figura 8, podemos ver como existe una primera etapa, donde el flujo es laminar. Existe un punto B a partir del cual la capa límite se transforma en transitoria. Si la velocidad sigue desarrollándose, la capa de flujo laminar se va reduciendo de forma logarítmica, mientras la capa turbulenta se va haciendo predominante hasta alcanzar su asíntota, que es cuando asume el 99% de la velocidad total.

La transición de capa límite laminar a turbulenta depende del denominado Reynolds “ x ”, definido como:

$$Re_x = \frac{\rho \cdot c \cdot x}{\mu}$$

(Ec. 3.11)

Para valores de Re_x superiores a determinados valores críticos se produce la transición. Estos valores dependen de las perturbaciones que el fluido experimenta mientras circula en la capa límite laminar.

Si en los primeros tramos de la placa existen rugosidades o protuberancias aparecerán componentes de velocidad transversales al flujo que facilitarán la generación de turbulencias y la transición para valores menores de “ x ”.

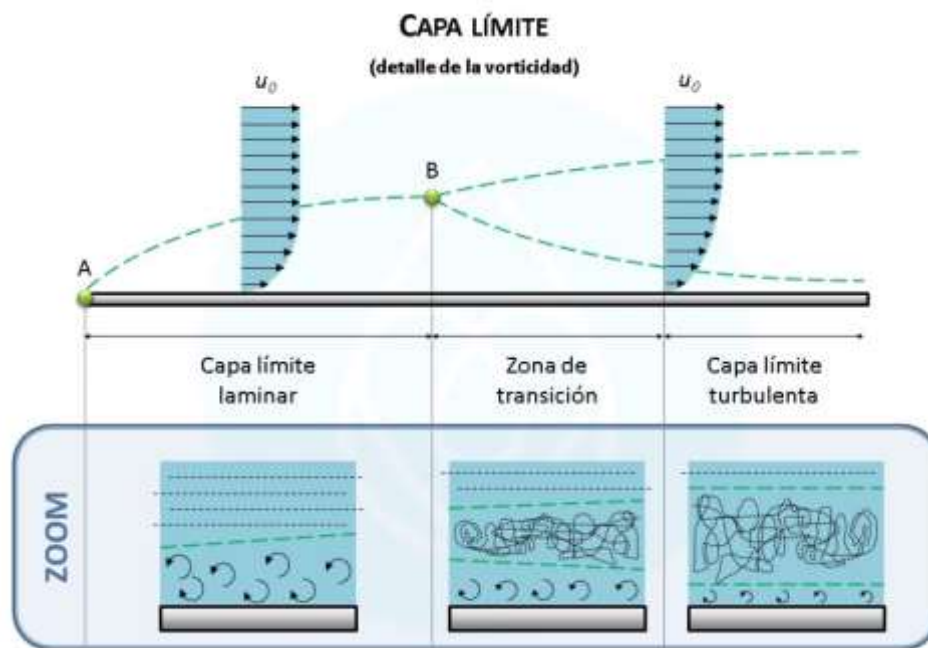


Figura 8. Transición del flujo en la capa límite de una pared plana paralela al flujo [7].

3.11. Presión en la capa límite

A medida que avanza la corriente el espesor de la capa límite crece. Debido a cambios en la geometría la presión puede aumentar en la dirección del flujo. Cuando mayor sea este gradiente de presión adverso, más dificultades tendrán las partículas para seguir avanzando, hasta que llegue un momento en el cual no puedan avanzar más y retrocedan hacia atrás en busca de zonas de menor presión. Esto hace que se comiencen a formar pequeños torbellinos de partículas (vórtices), dando inicio a la capa límite turbulenta y dando lugar al desprendimiento de la capa límite Figura 9.

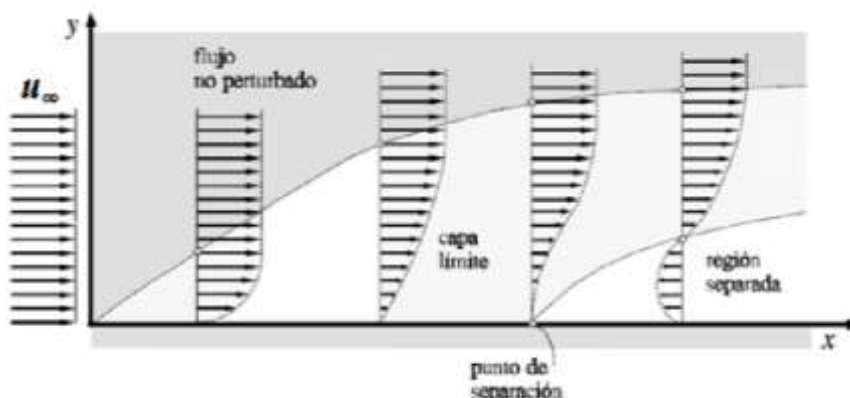


Figura 9. Proceso de desprendimiento de la capa límite [2].

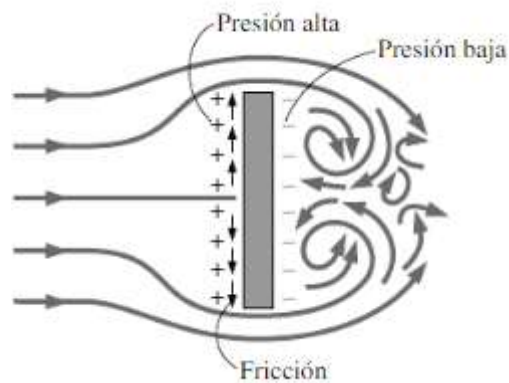


Figura 10. Presiones en una pared plana normal al flujo [2].

3.12. Fuerzas sobre cuerpos

Un fluido puede ejercer fuerzas y momentos sobre un cuerpo en y alrededor de varias direcciones. El efecto total de estas fuerzas es muy complejo. Sin embargo, para el estudio del diseño o comportamiento del cuerpo en un fluido, son solo dos las fuerzas resultantes más importantes: el arrastre y la sustentación. Estas fuerzas son iguales, ya sea, que el fluido se mueve alrededor del cuerpo o el cuerpo se mueve en el fluido.

Fuerza de arrastre (Drag): siendo una fuerza, el arrastre es un vector que va en dirección en la dirección del flujo.

Fuerza de sustentación (Lift): Es una fuerza ocasionada por el fluido en dirección perpendicular a la dirección del movimiento flujo.



Figura 11. Fuerzas que actúan sobre un cuerpo sumergido en un fluido [22].

3.13. Coeficientes adimensionales de fuerzas

Las fuerzas de arrastre y sustentación dependen de la densidad ρ del fluido, la velocidad corriente arriba V y el tamaño, forma y orientación del cuerpo, entre otras cosas, y no es práctico hacer una lista de estas fuerzas para una diversidad de situaciones. En vez de ello, es conveniente trabajar con parámetros adimensionales adecuados que representen las características de arrastre y sustentación del cuerpo. Estos parámetros son el coeficiente de arrastre C_D y el coeficiente de sustentación C_L ; se definen como:

Coeficiente de arrastre:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

(Ec. 3.12)

Coeficiente de sustentación:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

(Ec. 3.13)

Donde:

F_D = Fuerza de arrastre [N]

F_L = Fuerza de sustentación [N]

ρ = Densidad [kg/m³]

V = Velocidad [m/s]

A = Área [m²]

A por lo general es el área frontal del cuerpo (el área que se proyecta sobre un plano normal a la dirección del flujo).

Para nuestra geometría el **coeficiente de sustentación es despreciable**, ya que, para una placa plana normal al flujo, es decir, con un ángulo de 90º, solo actúa la fuerza de arrastre generada por presión.

Es evidente la gran importancia de la forma y la geométrica del cuerpo en los coeficientes. Como se puede observar en la Figura 12, cuanto mayor sea el aerodinamismo del cuerpo, menor es el coeficiente de arrastre. Este fenómeno es debido al desprendimiento de la capa límite, haciendo los cuerpos más aerodinámicos ayudamos a disminuir la separación de flujo y a disminuir el arrastre por presión.

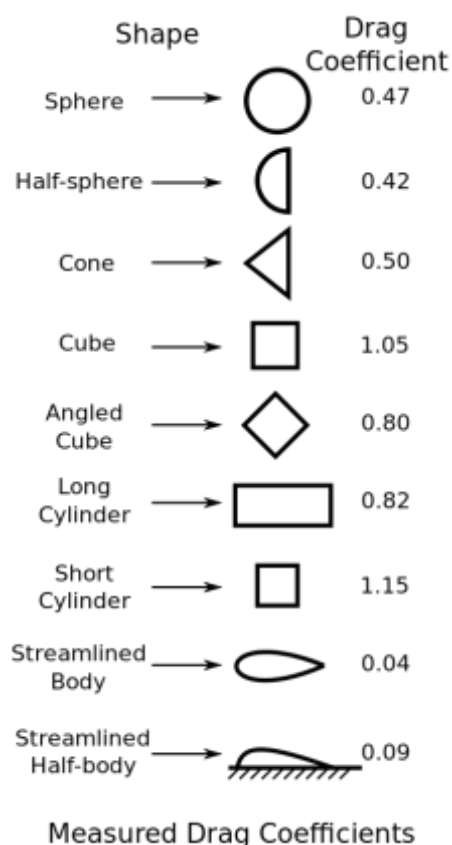


Figura 12. Coeficiente de arrastre para diferentes geometrías [21].

Los coeficientes de arrastre y sustentación locales varían a lo largo de la superficie como resultado de los cambios en la velocidad de la capa límite en la dirección del flujo. Existe interés en las fuerzas de arrastre y sustentación para toda la superficie que pueden determinarse con los coeficientes promedio de arrastre y sustentación, obteniendo así un valor medio (Figura 12).

Los coeficientes adimensionales varían directamente en función del número de Reynolds y del ángulo de ataque del fluido sobre el cuerpo. En la Figura 13 podemos ver como varia el coeficiente de arrastre según el número de Reynolds para diferentes geometrías.

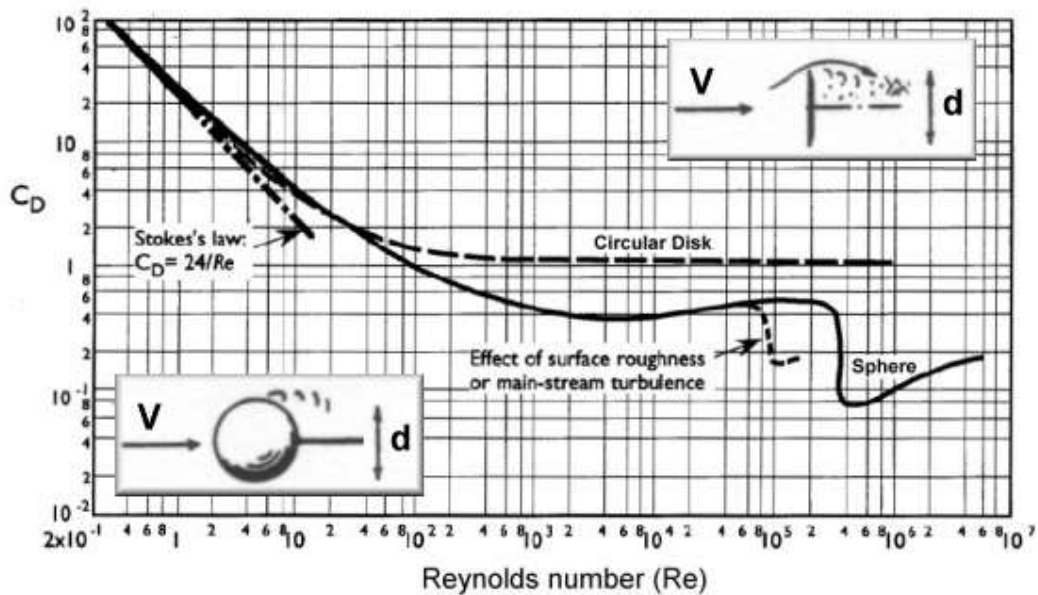


Figura 13. Coeficiente de arrastre promedio para diferentes geometrías según el número de Reynolds [16].

3.14. Fuerza de arrastre en una pared plana

A continuación, se dedicará atención a hablar sobre la fuerza de arrastre en una pared plana, debido a que es la fuerza predominante en este tipo de geometría.

Como ya he detallado anteriormente, el coeficiente de arrastre exhibe diferente comportamiento en las regiones bajas (flujos de Stokes), moderadas (laminar) y altas (turbulenta) del número de Reynolds.

Los efectos inerciales son despreciables en flujos con número de Reynolds bajo ($Re < 1$), llamados flujos de Stokes. En este caso, el coeficiente de arrastre es inversamente proporcional al número de Reynolds, y para diferentes cuerpos se tiene las siguientes expresiones:

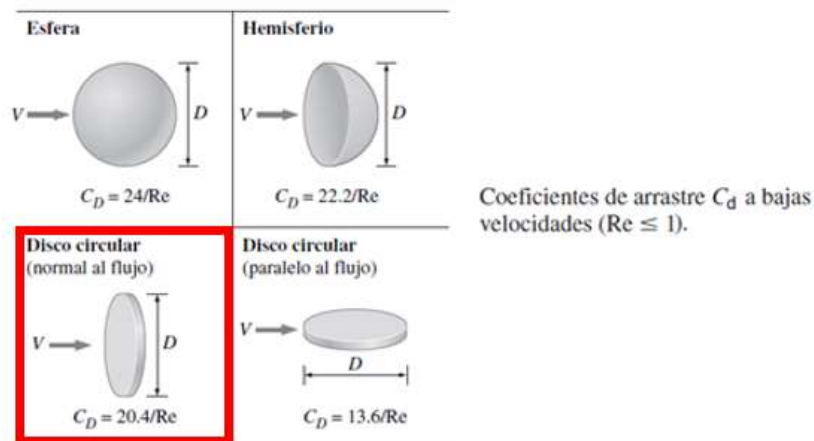


Figura 14. Coeficientes de arrastre C_D a bajas velocidades [2].

Para el resto de números de Reynolds, también se dispone de funciones que aproximan el coeficiente, pero es más comúnmente usado las gráficas basadas en pruebas experimentales echas en túneles de viento.

En gráficos como el de la Figura 15 están representados el coeficiente de arrastre respecto al número de Reynolds.

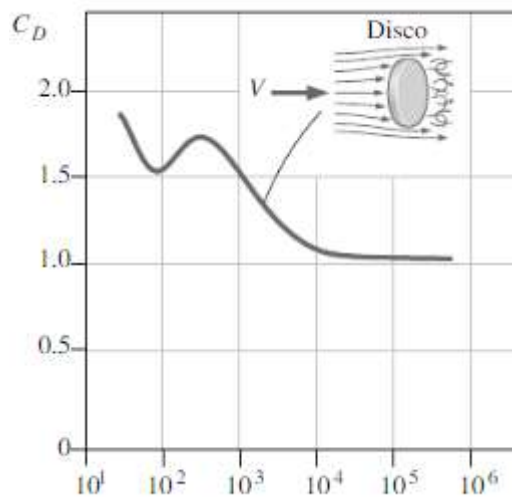


Figura 15. Coeficiente de arrastre de un disco plano normal al flujo según el número de Reynolds [2].

Para $10 < Re \approx 90$, donde el flujo es totalmente laminar, el coeficiente tiene una pendiente decreciente constante.

Para valores de $10^2 < Re < 10^3$ podemos ver como el coeficiente tiene un comportamiento irregular. Esto es debido a que para $Re \approx 90$ se empiezan a producir vórtices en la parte posterior del disco. Estos vórtices, causados por el juego de presiones que se generan en la geometría, van aumentando y alterando dicho coeficiente.

Para $10^3 < Re < 10^4$ el coeficiente decrece. En estos valores, encontramos el régimen transitorio.

Para $Re > 10^4$ los coeficientes de arrastre para la mayoría de las geometrías en esencia permanecen constantes. Esto se debe a que el flujo a números de Reynolds altos se vuelve totalmente turbulento. Para una placa plana normal al flujo, la separación ocurre en los bordes de las superficies frontal y posterior, sin cambio significativo en el carácter del flujo. En consecuencia, el coeficiente de arrastre de estos cuerpos es casi independiente del número de Reynolds. Por lo tanto, a partir de este valor, el coeficiente se va haciendo relativamente constante a un mismo valor.

Ahora bien, para nuestra geometría, teniendo en cuenta que trabajamos con números de Reynolds superiores a $Re > 10^4$, la biografía nos da de referencia un coeficiente de arrastre de 1,1 según la Figura 16.

Resistència de cossos tridimensionals a $Re > 10^4$

Representative drag coefficients C_D for various three-dimensional bodies for $Re > 10^4$ based on the frontal area (for use in the drag force relation $F_D = C_D A_f V^2 / 2$ where V is the upstream velocity)

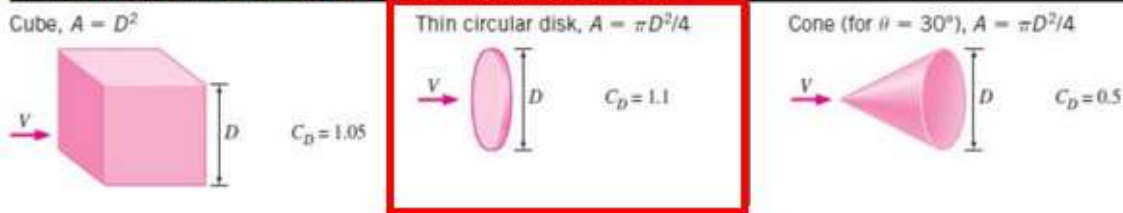


Figura 16. Coeficientes de arrastre C_D para varios cuerpos tridimensionales para $Re > 10^4$ [2].

Esta geometría tiene un gran parecido a la nuestra, pero en esta no tienen en cuenta el espesor, y considera un disco circular de espesor muy delgada.

Nuestra geometría tiene un espesor de 15 mm y una relación L/D de 0,3. Este hecho causa una pequeña variación en el coeficiente de arrastre. Por lo tanto, disponemos de la Figura 17 de una fuente fiable donde se puede ver que el coeficiente es 1,28 para la misma geometría. Entonces dicho coeficiente debería variar entre estos valores.

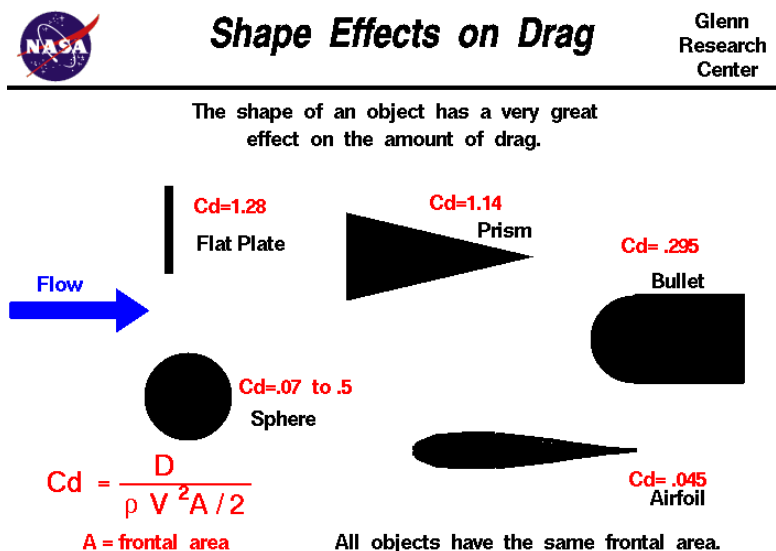


Figura 17. Coeficientes de arrastre C_D para varias geometrías [10].

Por lo tanto, nuestro coeficiente de arrastre debe variar entre los coeficientes de estas dos geometrías, debido a que se pueden considerar las dos de fuentes fiables.

3.15. Modelo de turbulencia

Las ecuaciones de Navier-Stokes son las que describen el comportamiento de un fluido, junto con la ecuación de continuidad. Al ser resueltas entregan el campo de velocidad y de presión para todo el flujo en estudio. En casos más generales se debe agregar la ecuación de energía y considerar posibles cambios en la densidad del fluido, de modo que se deben resolver simultáneamente más ecuaciones para obtener la distribución de temperaturas y el valor de la densidad en cada punto del flujo. Todo lo anterior puede variar en función del tiempo para estudios que no sean estacionarios.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son excesivamente complejas y no poseen solución analítica por el momento. Este conjunto de ecuaciones, al no tener solución analítica conocida, hace necesario el uso de métodos numéricos para obtener el buscado campo de presión y velocidad. Los métodos numéricos que se emplean actualmente discretizan el espacio en estudio, es decir, convierten el dominio continuo en un dominio formado por partes. Esto con el objetivo de asignar valores específicos a cada variable en cada parte, e ir cambiando estos valores hasta lograr una solución al problema.

Estos modelos numéricos son conocidos como modelos de turbulencia.

3.15.1. Modelo SST Turbulence

El modelo de turbulencia SST k-omega es un modelo de viscosidad turbulenta de dos ecuaciones. El uso de una formulación k-omega en las partes internas de la capa límite hace que el modelo se pueda usar directamente hasta la pared a través de la subcapa viscosa. La formulación SST también cambia a un comportamiento k-epsilon en la corriente libre y, por lo tanto, evita el común problema k-epsilon de que el modelo es demasiado sensible a las propiedades de turbulencia de entrada de la corriente. Este modelo tiene un muy buen comportamiento en gradientes de presión adversos y flujo de separación.

El principal motivo de uso de este modelo de cálculo computacional fluido dinámico, es el hecho de que el programa cambia por si solo los modelos sin necesidad de interacción del usuario, otorgando una mejor precisión y una mayor simplicidad del cálculo.

4. FUNDAMENTOS EXPERIMENTALES

4.1. Túnel de viento

Los túneles de viento, también llamados túneles aerodinámicos, son un sistema que genera una corriente de aire controlada mediante un ventilador cuya aplicación se basa en lograr condiciones especiales del flujo y simular el movimiento de objetos con el fin de analizar los fenómenos aerodinámicos, como las fuerzas y líneas de corriente, entre otros.

Este sistema ha adquirido mucha importancia en el mundo científico-técnico, ya que, es el método más rápido y económico de dimensionar el comportamiento de diferentes objetos bajo un cierto flujo. Esta popularidad es gracias a su facilidad de trabajar y simular casos reales a escalas reducidas obteniendo resultados reales y rigurosos.



Figura 18. Túnel de viento de Ferrari [19].

4.2. Principios de funcionamiento

El aire es soplado o aspirado a través de un conducto equipado con rejillas estabilizadoras al comienzo para garantizar que el flujo se comporte de manera laminar o con obstáculos u otros objetos si se desea que se comporte de forma turbulenta.

Los modelos se montan en la sección de ensayos para su estudio en un equipo llamado báscula a la cual están colocados los sensores que ofrecen la información necesaria para calcular los coeficientes de sustentación y resistencia.

4.3. Partes de un túnel de viento

Cámara de establecimiento: Su objetivo es enderezar y uniformizar el flujo de entrada.

Cono de aceleración: Su función es acelerar la velocidad del flujo manteniéndolo ordenado y uniforme para su llegada a la cámara de ensayos.

Cámara de ensayos: Es la parte más importante del sistema. Es dónde se coloca el objeto que queremos estudiar y también dónde haremos las mediciones.

Difusor: Una vez el aire ya ha pasado por la cámara de ensayos, el difusor reduce la velocidad del flujo mediante su perfil divergente. Nos interesa que el aire salga a la menor velocidad posible ya que la velocidad de salida irá relacionada con las pérdidas energéticas del túnel. A menor velocidad, menores son las pérdidas.

Ventilador: Su función es crear un flujo de aire a una cierta velocidad. Normalmente llevan aparatos electrónicos para poder variar la velocidad y así realizar ensayos bajo las condiciones deseadas. Pueden estar colocado a la entrada o a la salida

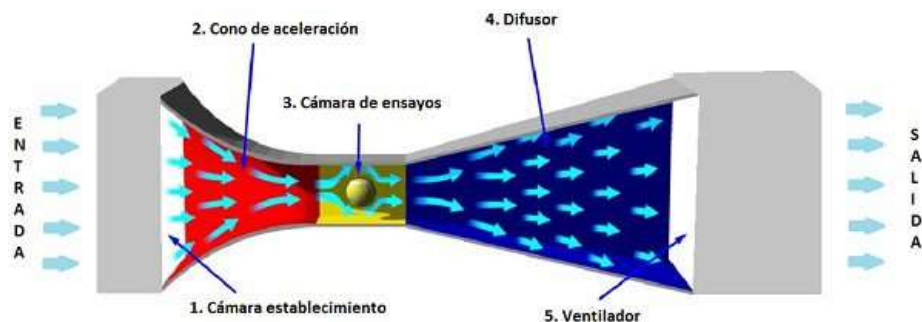


Figura 19. Partes de un túnel de viento [19].

4.4. Clasificación

Los túneles aerodinámicos se clasifican según cuatro conceptos: tipo de ciclo, tipo de cámara de ensayo, según como se impulse el aire y la velocidad de ensayo.

4.4.1. Tipo de ciclo

Ciclo abierto: El aire accede por la sección de entrada, se dirige a la cámara de ensayos, la atraviesa y sale por la sección de salida. Las secciones de entrada y de salida están abiertas a la atmósfera.



Figura 20. Túnel de viento de ciclo abierto [6].

Ciclo Cerrado: el flujo circula por el interior del túnel sin salir a la atmósfera. Una ventaja muy importante que tiene el cerrado es que permite tener controladas las variables termodinámicas del aire: densidad, temperatura y presión. El túnel cerrado tiene menos pérdidas que el abierto.

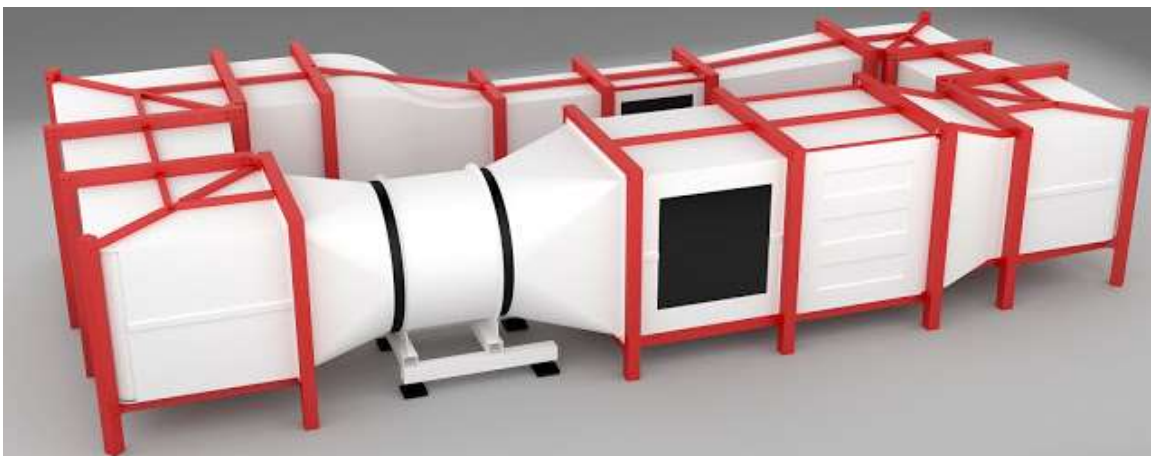


Figura 21. Túnel de viento de ciclo cerrado [15].

4.4.2. Tipo de cámara de ensayo

Sección abierta: la cámara de ensayos no dispone de paredes que enlacen la cámara de aceleración con el difusor y el flujo de aire en torno al modelo es libre.

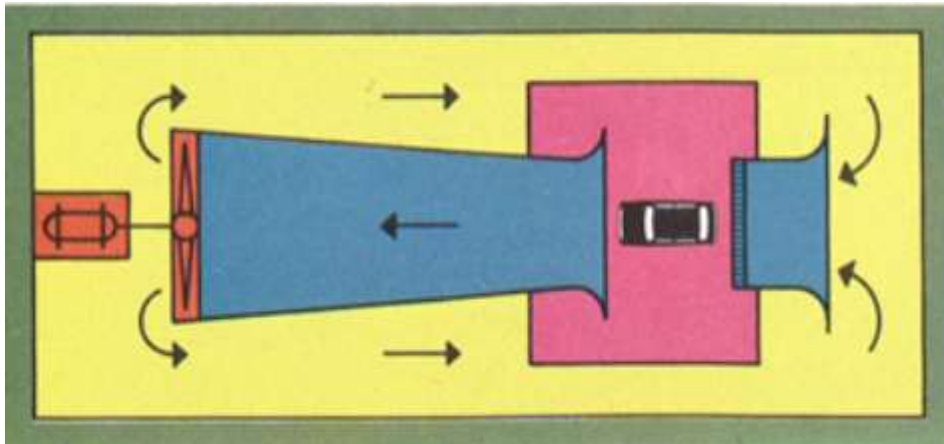


Figura 22. Ilustración de un túnel de viento de sección abierta [17].

Sección cerrada: en los túneles de sección cerrada la cámara de ensayos está unida a la cámara de aceleración y al difusor, y el flujo queda entubado.

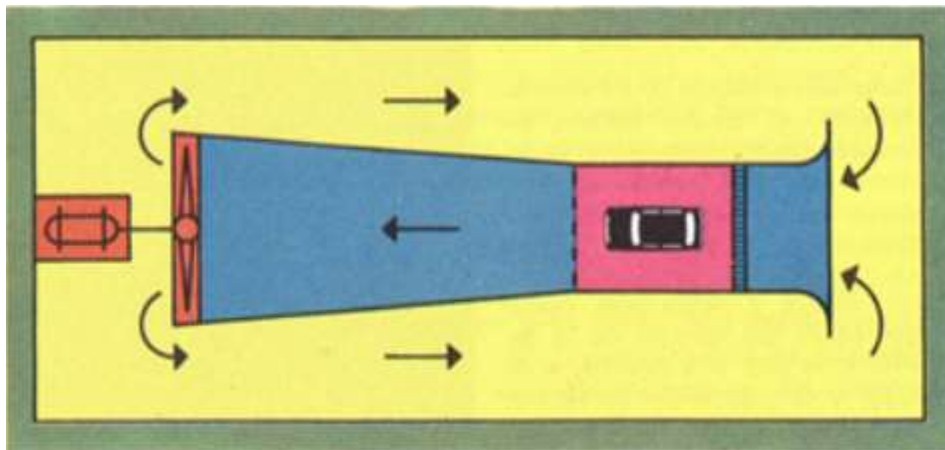


Figura 23. Ilustración de un túnel de viento de sección cerrada [17].

4.4.3. Impulso del aire

Soplado: el ventilador se encuentra antes de la cámara de ensayos y el aire es impulsado hacia ella.

Aspirado: el ventilador se encuentra después de la cámara de ensayos y el aire es aspirado hacia ella.

4.4.4. Velocidad de ensayo

Por último, se clasifican los túneles según la velocidad de ensayo que pueden adquirir. La velocidad predomina directamente en el número de Mach (visto en la sección *Número de Mach*). Según el número de Mach adquirido, se clasificarán en:

Subsónicos para $M < 0.7$

Transónico para $0.7 < M < 1.2$

Supersónico $1.2 < M < 5$

Hipersónico $M > 5$

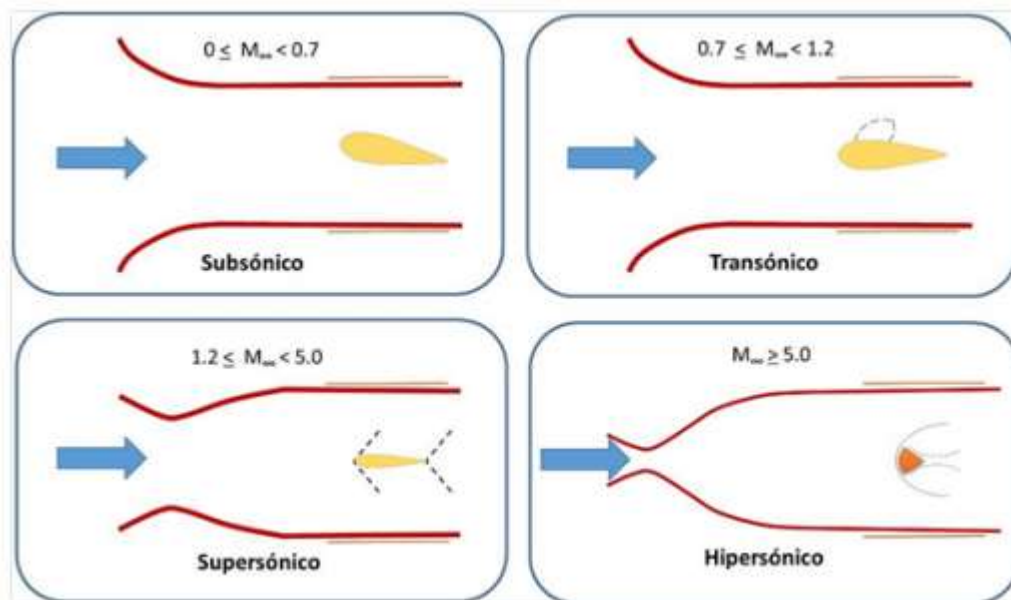


Figura 24. Ilustración de la forma del túnel de viento según la velocidad de ensayo [1].

4.5. Túnel de viento experimental

El túnel de viento que disponemos en la Escuela de Ingeniería de Barcelona Este (EEBE) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) pertenece a la marca TecQuipment y se trata del modelo Subsonic Wind Tunnel (AF100)



Figura 25. Túnel de viento del laboratorio de la universidad EEBE [6].

Según la clasificación descrita anteriormente, este modelo se trata de un túnel de viento con circuito abierto, con cámara de ensayo cerrada, de aspirado y velocidad de ensayo subsónica. Para determinar el tipo de velocidad hay que destacar que la velocidad máxima de ensayo alcanzable es de 36 m/s. Si se calcula el número de Mach obtenemos:

$$M = \frac{V}{V_s} = \frac{36 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}} = 0,1058$$

Otras características específicas dadas por el manual son:

Dimensiones totales: 3700mm x 1065mm x 1900mm

Peso total: 293kg

Dimensiones del área de trabajo: 305mm x 305mm x 600mm

Velocidad de trabajo: [0 a 36] [m/s]

Temperatura de trabajo: [5 a 40][°C]

Máximo nivel de ruido: 80 dB(A)

4.6. Funcionamiento del túnel de viento

4.6.1. Entrada

El fluido entra por la tobera diseñada para acelerar el aire de manera lineal. Posteriormente, el aire atraviesa el estabilizador de flujo con forma de nido de abeja, el cual, su función es evitar que se creen turbulencias a la entrada del fluido y que este sea lo más laminar posible.



Figura 26. Tobera [6].

Seguidamente, el flujo de aire entra en la cámara de ensayo, que es nuestra área de trabajo. Está área es de sección cuadrada con las paredes lisas. Las paredes de la cámara de ensayos son de metacrilato y pueden ser desmontadas para el montaje de la pieza de estudio.

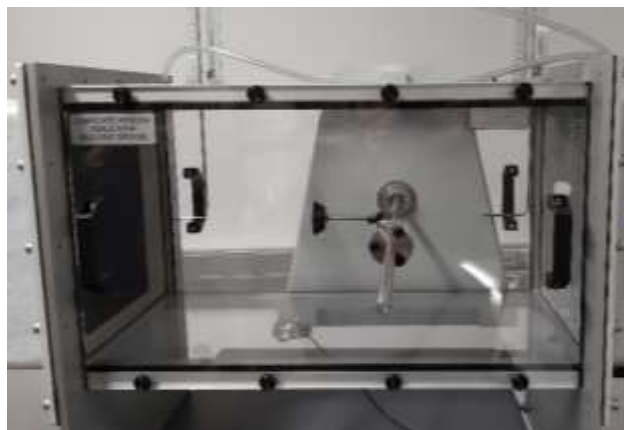


Figura 27. Cámara de ensayo.

4.6.2. Cámara de ensayo

En la sección de trabajo, en la parte superior, están instalados dos medidores deprimógenos que pueden desplazarse verticalmente a lo largo de la zona de ensayo.

El primero es un tubo Pitot que permite medir la velocidad del aire a la entrada de la zona de trabajo. El segundo es un tubo Prandtl, que mide la velocidad a la salida de la zona de trabajo. Están colocados a 60mm i 495mm de la entrada respectivamente (Figura 28). Ambos medidores están conectados a unos manómetros de presión diferencial representados en la Figura 29 .

En esta zona de trabajo, también encontramos un orificio en cada uno de los laterales de la caja. En uno de estos orificios va colocada una báscula simple de ajustar, la cual, sus funciones son las de mantener el modelo en la sección de trabajo y la de medir las fuerzas de arrastre (drag) y de sustentación (lift) del modelo. Esta báscula está conectada a una unidad con display digital que indica la fuerza medida que genera el flujo sobre el cuerpo. También hay colocado un medidor de ángulos (protactor), para posibles ensayos con diferentes ángulos de ataque si se requiere.

En el otro lado va el orificio donde va colocada la barra dummy, que su función es la de neutralizar los efectos aerodinámicos que genera el soporte de la pieza de estudio.

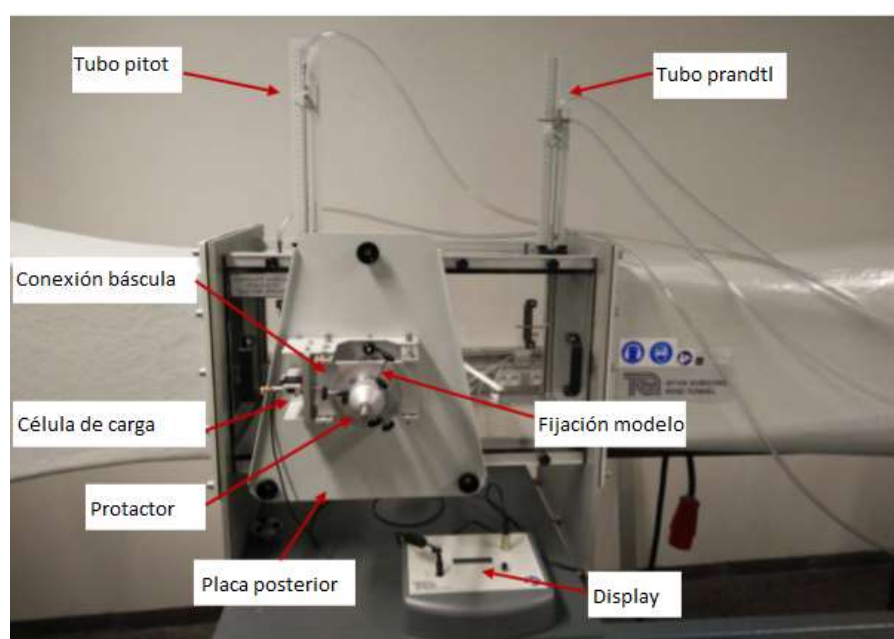


Figura 28. Componentes de la cámara de ensayo [4].

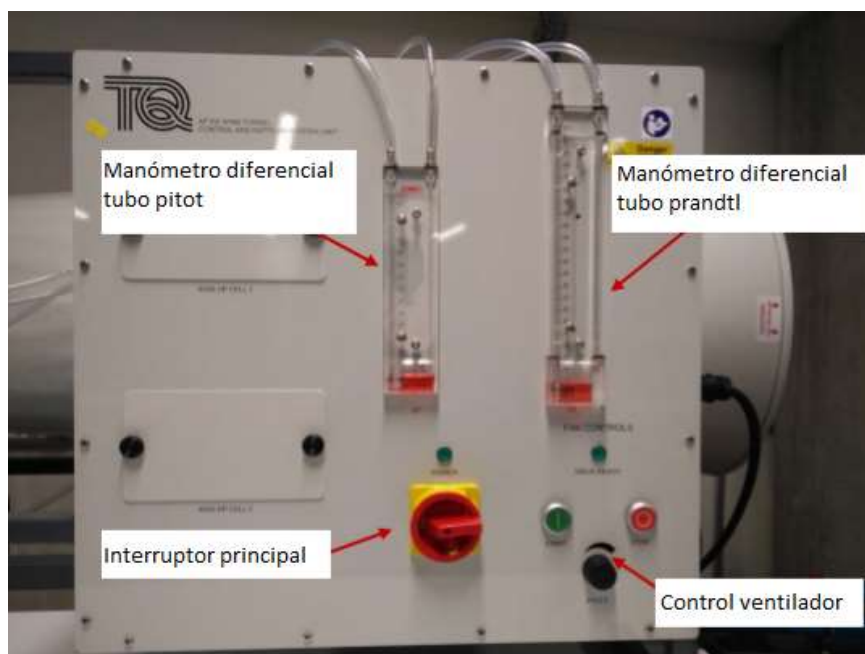


Figura 29. Sistema de control y medida [4].

4.6.3. Salida

Después de pasar la zona de trabajo, el flujo de aire se topará con una rejilla muy fina que protege el ventilador de posibles daños causador por solidos desprendidos.

Posteriormente pasa por el difusor que lo dirige hasta el ventilador axial de velocidad variable. Este ventilador va conectado a una unidad de control que permite controlar la velocidad de giro del ventilador y por tanto la velocidad de paso del aire en la sección de trabajo (Figura 29).

Seguidamente, después de pasar por el ventilador, el flujo se encuentra con un silenciador para reducir la cantidad de ruido producida. Finalmente, el aire es expulsado a la atmosfera (Figura 30).

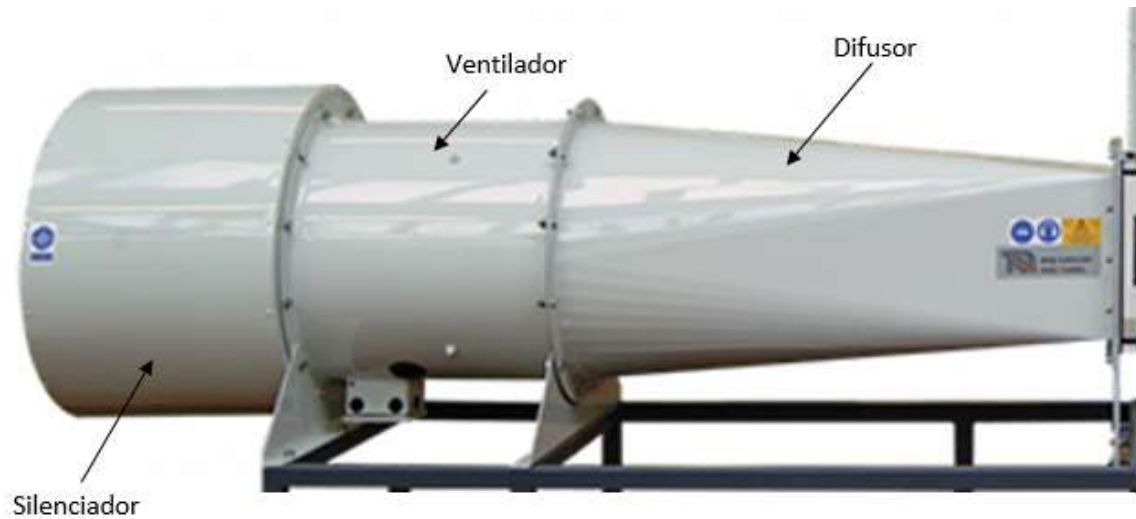


Figura 30. Componentes de salida del túnel de viento [5].

4.7. Cuerpo a estudiar

Este túnel de viento viene con 5 geometrías diferentes y la barra dummy.

- (a) Esfera lisa
- (b) Media esfera
- (c) Placa plana
- (d) Esfera con concavidades (similar a pelota de golf)
- (e) Cuerpo fusiforme
- (f) Barra dummy

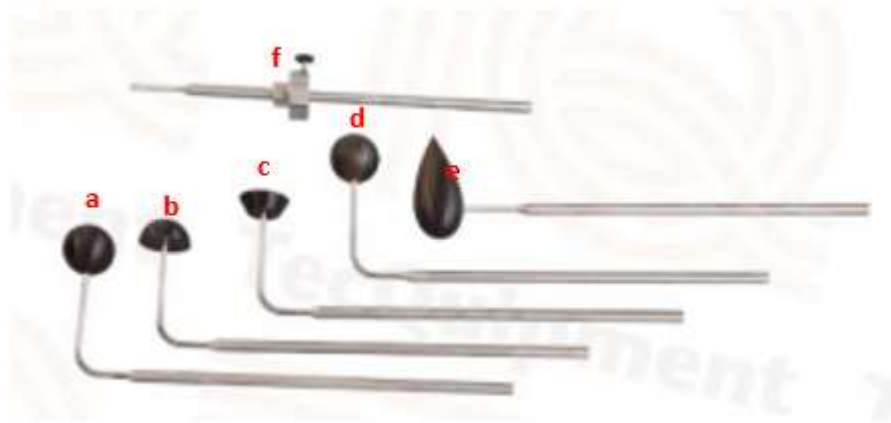


Figura 31. Geometrías disponibles del túnel de viento [5].

En nuestros experimentos vamos a estudiar la placa plana (c). Las características de esta geometría según el manual de instrucciones del túnel de viento son:

$D = 50 \text{ mm}$ (superficie lisa)

$m = 0,4 \text{ kg}$

$A_{\text{frontal}} \text{ placa plana} = 0,0019635 \text{ m}^2$

$A_{\text{frontal}} \text{ barra dummy} = 0,001356 \text{ m}^2$

4.8. Procedimiento experimental

En este apartado se explicará detalladamente los procedimientos seguidos para realizar dichos experimentos de manera correcta y así conseguir unos datos experimentales adecuados.

Se han realizado en total tres experimentos. Uno de los experimentos es la determinación del perfil de velocidades en dos líneas aguas arriba y aguas debajo de la zona de ensayos. Los otros dos experimentos se llevaron a cabo para obtener las fuerzas que actúan sobre la pared plana y la barra dummy.

4.8.1. Instalación del modelo a estudiar

1. Retirar la pared posterior colocada enfrente del dispositivo de báscula.
2. Desde dentro de la sección de trabajo, insertar el modelo a la báscula.
3. Mirando desde la entrada del túnel de viento, colocar el modelo justo en el centro de la sección de trabajo.
4. Medir las distancias X Y Z desde el modelo para asegurar que la geometría está situada justo en el centro.
5. Restaurar a su posición la pared posterior del túnel e insertar la barra dummy, sin que toque la barra del modelo, dejando una separación aproximada de 1mm.
6. Poner el protractor en 0° .

Una vez realizados estos pasos, ya tenemos el modelo listo para empezar los experimentos.

4.8.2. Procedimiento de medida del perfil de velocidad

1. Colocar el Pitot, que está situado en la entrada de la sección de trabajo, en el centro del túnel y encender el ventilador a una velocidad de 30 m/s.
2. Colocar el Pitot en la pared inferior del túnel. Medir la presión dinámica y la posición del Pitot.
3. Mover el Pitot hacia arriba 1 mm y volver a medir la presión. Continuar midiendo cada milímetro hasta llegar a los 20 mm de separación de la pared inferior.
4. Medir cada 20 mm hasta llegar a los 20 mm de separación respecto la pared superior, después medir cada 1 mm hasta el final.
5. Repetir el mismo procedimiento con el tubo Prandtl situado a la parte posterior de la sección de trabajo.
6. Representar las gráficas de la velocidad enfrente la posición.

4.8.3. Procedimiento de medida de fuerzas

1. Asegurarse que el modelo está bien sujeto y que la báscula está colocada para medir la fuerza deseada (en nuestro caso Drag).
2. Poner en marcha el sistema de control y medida.
3. Poner en marcha la unidad con display y dejar que se estabilice durante cinco minutos.
4. Pulsar durante unos segundos el botón ZERO para establecer en cero el variador de fuerzas.
5. Empezar el experimento anotando las fuerzas que actúan sobre el modelo según vamos variando la velocidad del flujo.
6. Cambiar la barra dummy a la báscula y medir las fuerzas que actúan sobre esta a las mismas velocidades que hemos utilizado en el punto 5.

4.9. Resultados experimentales

En este apartado se expondrán los resultados obtenidos de las pruebas experimentales realizadas en el túnel de viento de la universidad. Se mostrarán los perfiles de velocidad a diferentes velocidades, las fuerzas de arrastre y los coeficientes de arrastre. El ensayo se realizó el 12 de junio de 2020 en las siguientes condiciones (Tabla 1):

| Dimensión | Valor |
|-----------------------------------|----------------------------|
| Temperatura (T) | 23,5 °C |
| Densidad (ρ) | 1,1822 kg/m ³ |
| Presión atmosférica (P_{atm}) | 1006 mbar |
| Viscosidad (μ) | 1,80·10 ⁻⁵ Pa·s |
| Diámetro esfera (D) | 50 mm |
| Área esfera (A) | 0,001963 m ² |
| Diámetro dummy (D_d) | 12 mm |
| Área dummy (A_d) | 0,001356 m ² |

Tabla 1. Condiciones de ensayo.

El experimento se divide en dos partes, en la primera se recogen los valores para determinar los perfiles de velocidad y en la segunda se obtienen las fuerzas que actúan sobre los elementos (esfera y cilindro dummy).

4.9.1. Perfiles de Velocidad

En la primera parte se obtuvieron los siguientes resultados:

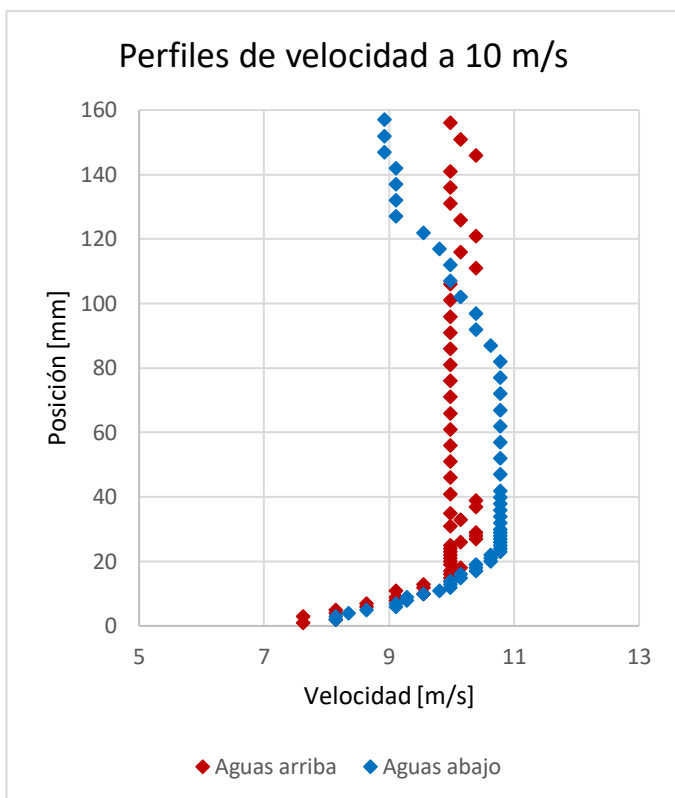


Figura 32. Perfiles de velocidad experimentales a 10 m/s

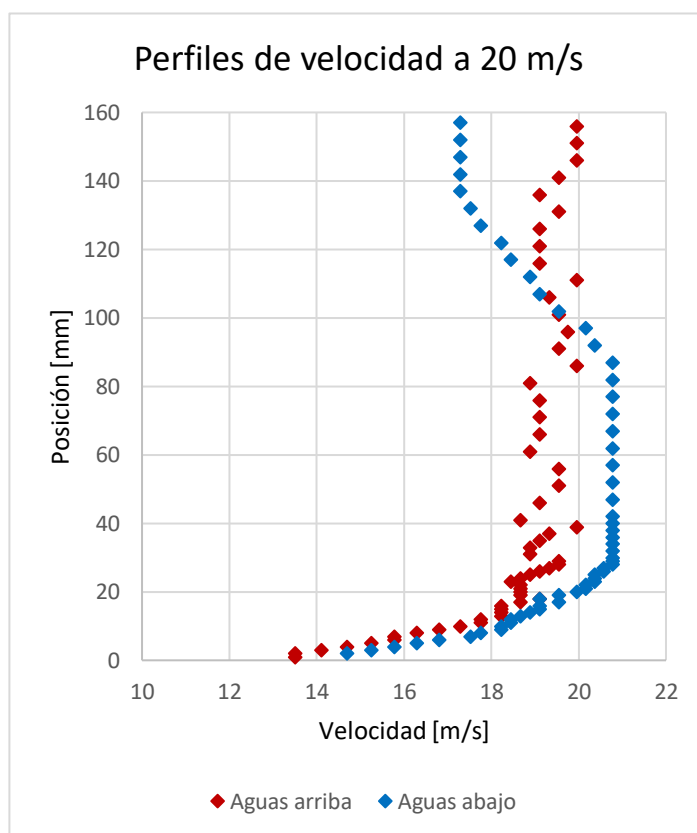


Figura 33. Perfiles de velocidad experimentales a 20 m/s

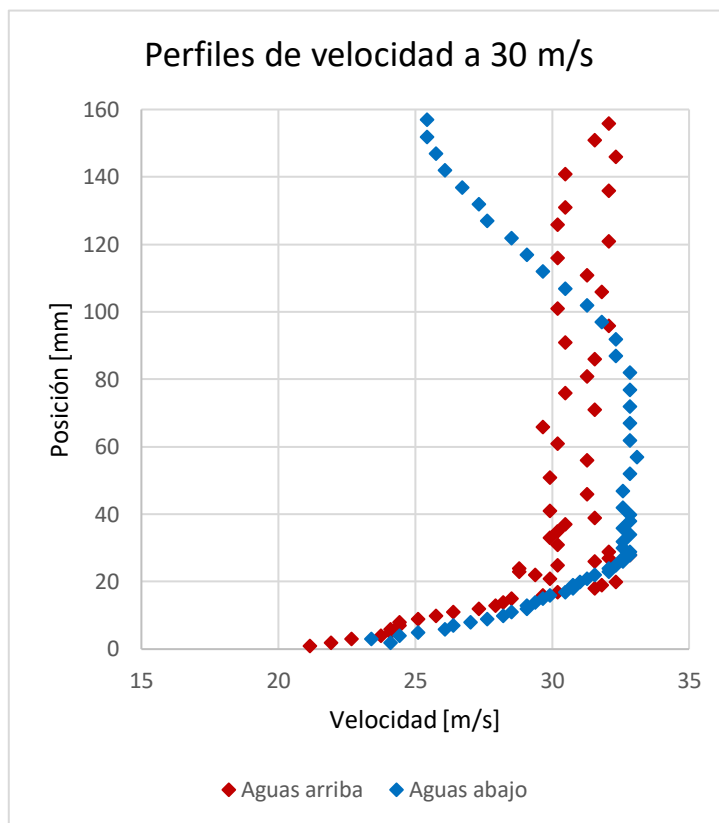


Figura 34. Perfiles de velocidad experimentales a 30 m/s

En las Figuras 32, 33 y 34 están representados los perfiles de velocidad aguas arriba y aguas abajo a diferentes velocidades. Podemos observar como a más baja velocidad, más uniforme es el perfil. Un claro ejemplo es si comparamos el perfil aguas arriba a 10 m/s y a 30 m/s. El perfil de velocidad más lento adquiere un perfil casi recto con pequeñas variaciones cerca del centro (Figura 32), en cambio, el perfil con mayor velocidad adquiere una trayectoria en forma de zigzag durante todo el perfil. Este hecho ocurre debido a la turbulencia del flujo que se genera a altas velocidades.

Otro fenómeno que podemos observar en todos los perfiles es el aumento del tamaño de la capa límite en los perfiles aguas abajo respecto los perfiles aguas arriba. Esto es debido a la evolución de la capa límite a lo largo del suelo del túnel de viento, donde esta se va haciendo más grande a medida que avanza por la cámara de ensayo.

También se puede observar claramente como la velocidad aguas abajo es notablemente superior a la inicial debido a las restricciones de área que generan el cuerpo y sus respectivos soportes.

Finalmente, podemos ver en los perfiles aguas abajo como alrededor de 90 mm respecto el suelo la velocidad empieza a disminuir lentamente debido al déficit de velocidad que se genera detrás de la geometría ensayada. Este déficit de velocidad es conocido también como estela.

4.9.2. Fuerzas y coeficientes

En la segunda parte se obtuvieron los siguientes resultados:

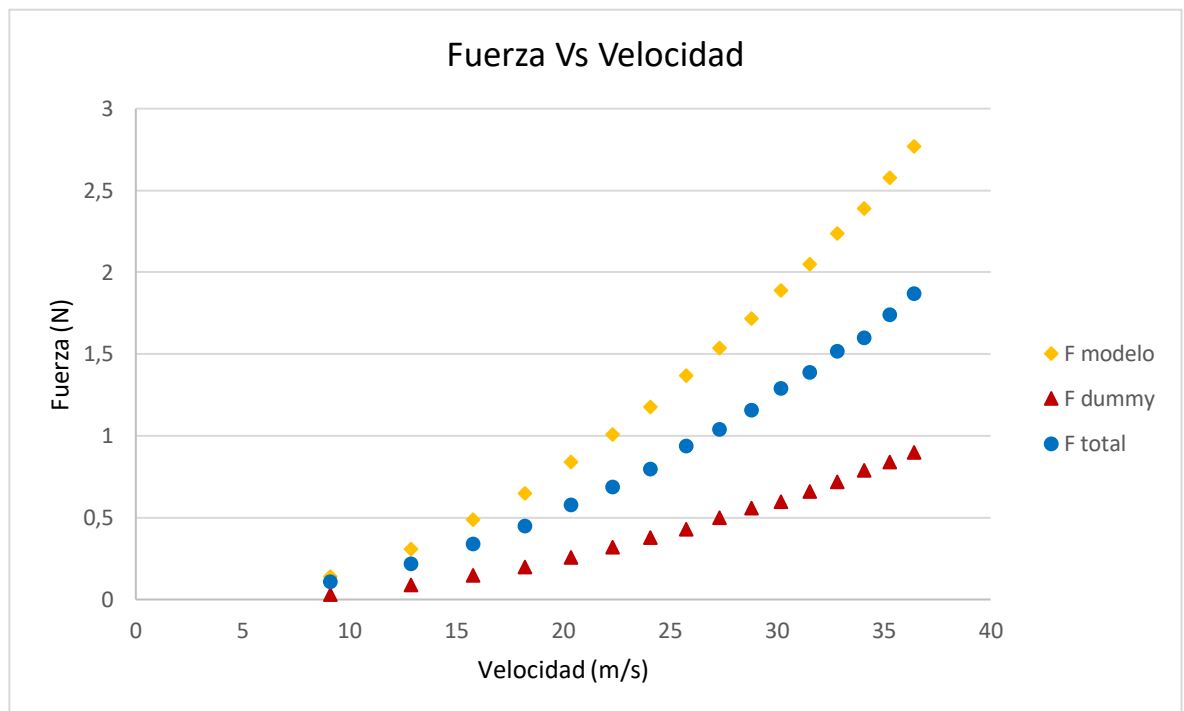


Figura 35. Fuerzas total y fuerzas sobre la placa plana y el cilindro dummy a 30 m/s.

En el gráfico de la Figura 35 podemos observar el incremento de las fuerzas a medida que aumenta la velocidad del flujo. Podemos observar un aumento con tendencia cuadrática debido a la ecuación del coeficiente de arrastre (Ec. 3.12) donde la componente de velocidad está elevada al cuadrado. La fuerza total se obtiene mediante la resta entre la fuerza que se ejerce sobre el modelo y la fuerza del cilindro dummy.

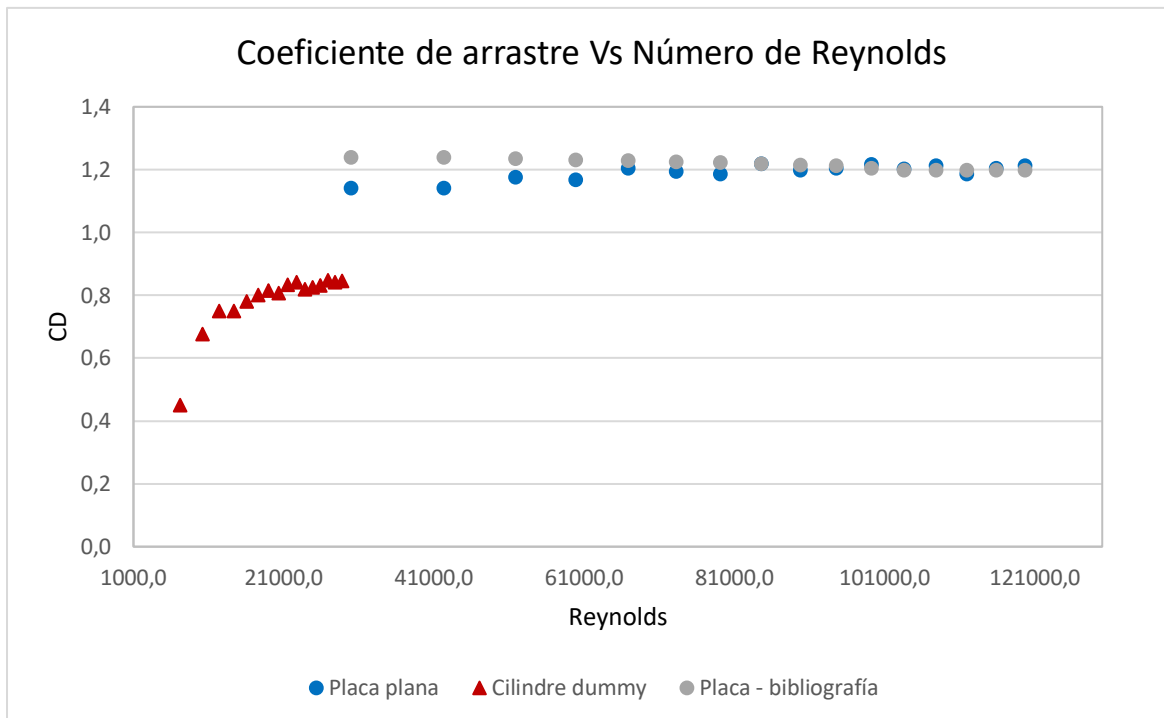


Figura 36. Comparación del coeficiente de arrastre experimental con el de la bibliografía vs Número de Reynolds.

En la Figura 36 están representados los coeficientes de arrastre de la placa plana y de la barra dummy para diferentes números de Reynolds. En primer lugar, podemos observar como el coeficiente de arrastre del cilindro es inferior al de la placa plana y a medida que va aumentando el Reynolds, este va cogiendo un valor constante alrededor de 0,80.

También podemos ver representado el coeficiente de arrastre experimental de la placa plana. Podemos observar como los valores son muy próximos a 1,2 a números de Reynolds de 3×10^4 y a medida que aumenta el Reynolds este va adquiriendo el valor exacto de 1,2.

Finalmente, se han representado los valores bibliográficos obtenidos de la Figura 13 para obtener una comparación visual de ambos resultados. Es necesario comentar que los valores bibliográficos se han obtenido de manera visual y existe cierto error en ellos. Sin embargo, podemos afirmar que ambos valores son muy próximos incluso considerando el error humano.

Una vez expuesto los resultados, podemos concluir que en las pruebas experimentales se ha obtenido unos resultados muy gratificantes una vez comparados con los bibliográficos.

5. Simulación Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

5.1. Introducción al ANSYS Fluent

ANSYS Fluent es un programa de diseño, análisis y simulación numérica que pretende predecir cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real. Este software funciona bajo la teoría de elemento finito para estructuras y volúmenes finitos para fluidos.

ANSYS está dividido en tres herramientas principales llamados módulos: pre-procesador (creación de geometría y mallado), procesador y post-procesador.

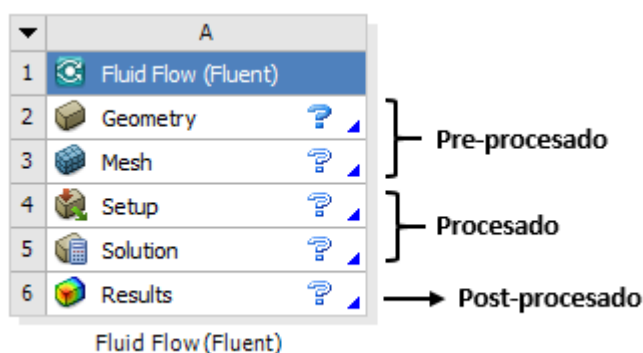


Figura 37. Panel de control del "Workbench"

El módulo de pre-procesado está formado por los apartados geometría y mallado. En este apartado se establece el modelo, pudiéndose construir geometrías, creando líneas, áreas o volúmenes o incluso exportar la geometría de otro programa de diseño.

Una vez cargada la geometría, se lleva a cabo la creación de la malla. En este apartado, podemos aplicar diferentes modelos de malla, pudiéndose generar a mano o usando las herramientas de generación automática o controlada de mallas. El mallado es considerado uno de los apartados más relevantes e importantes, debido a que, dependiendo de la densidad de la malla, tipo de elementos, etc. los resultados varían completamente. Para obtener un resultado válido, se debe hacer un estudio de convergencia de la malla.

El procesado consiste en la aplicación de cargas, donde se aplican condiciones de contorno en los nodos y elementos y se lleva a cabo la simulación numérica. En este apartado, podemos aplicar las propiedades correspondientes a las diferentes partes de nuestra geometría, dar características físicas a nuestro fluido y seleccionar el método de cálculo. Aquí podemos manejar valores de fuerzas, tracción, desplazamiento, momento o rotación.

Finalmente, en el post-procesado se obtiene la visualización de los resultados. En este apartado podemos visualizar tanto la geometría con los resultados de nuestro estudio u obtener gráficas o tablas con los valores numéricos.

5.2. Creación de la geometría

Para la creación de la geometría se puede utilizar el mismo programa ANSYS Fluent que dispone de una interfaz CAD para diseño de geometrías, sin embargo, he decidido utilizar un programa externo con el cual estoy más familiarizado y dispongo de más experiencia. El programa utilizado para la creación de la geometría ha sido el **Autodesk Inventor 2020**.

Para la generación de la geometría, se tomaron medidas reales de la pieza en el laboratorio, y posteriormente se creó la geometría.

Esta geometría se creó en base a un rectángulo sólido, que representa la cámara de ensayo, y en su interior se realizó un vaciado con la geometría establecida. Se realizaron en total dos diseños diferentes; en uno solo disponemos de la placa plana (Figura 38) , y en el otro, se diseñó la placa plana con sus soportes y con la barra dummy (Figura 39).

Una vez hecho el diseño en Inventor, se procede a exportar dicho archivo. Para ello debemos guardar el diseño en formato *STP* para que pueda ser procesador por ANSYS. Una vez guardada la geometría, tan solo debemos abrir la interfaz de “*Workbench*” y en el apartado “*Geometry*” exportar la geometría creada.

Es esencial que, dentro de dicho apartado, cambiemos el estado de la geometría de solido a **fluido** para poder realizar los posteriores cálculos.

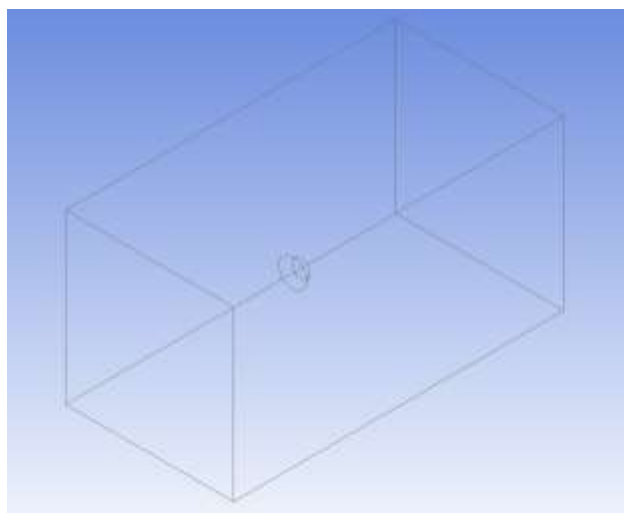


Figura 38. Geometría sin soportes.

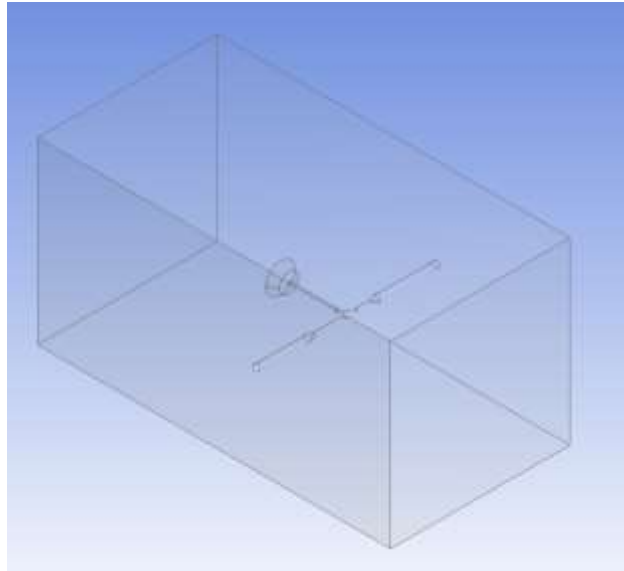


Figura 39. Geometría con soportes y barra dummy

5.3. Creación de la malla

Para la creación de la malla, hay que iniciar el módulo de “Mesh”. Primero, se han agregado etiquetas con nombres a las diferentes partes de la geometría de estudio, diferenciando entre la entrada y salida de flujo, las paredes de la cámara de ensaño y la placa plana (Figura 40 y Figura 41). Estas etiquetas nos servirán posteriormente para el Setup donde se dan las condiciones de contorno.

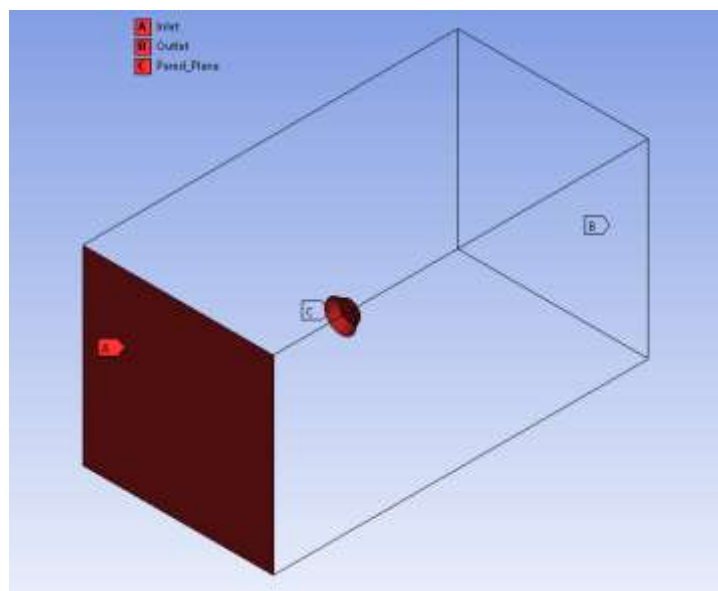


Figura 40. Etiquetas en la geometría (1)

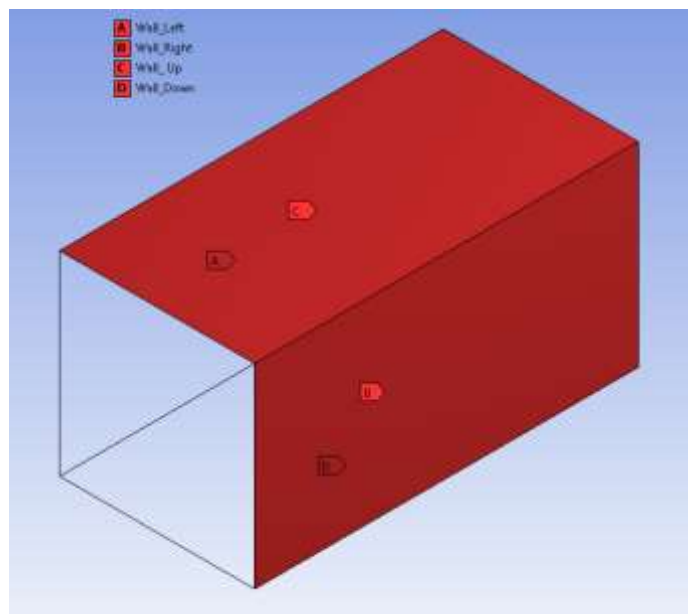


Figura 41. Etiquetas en la geometría (2)

Seguidamente se procede a la creación de la malla. Este punto es fundamental para obtener unos resultados fiables ya que la precisión de cálculo es definida por el número de elementos de malla. Para ello se ha utilizado la herramienta “Sizing” en “Mesh Control” con la que se ha dado diferentes tamaños a los elementos.

Posteriormente se ha aplicado un “Face Meshing” a todas las paredes de la cámara de ensaño. Con esta herramienta el programa crea una malla organizada en las áreas seleccionadas y con este proceso nos facilita el posterior cálculo.

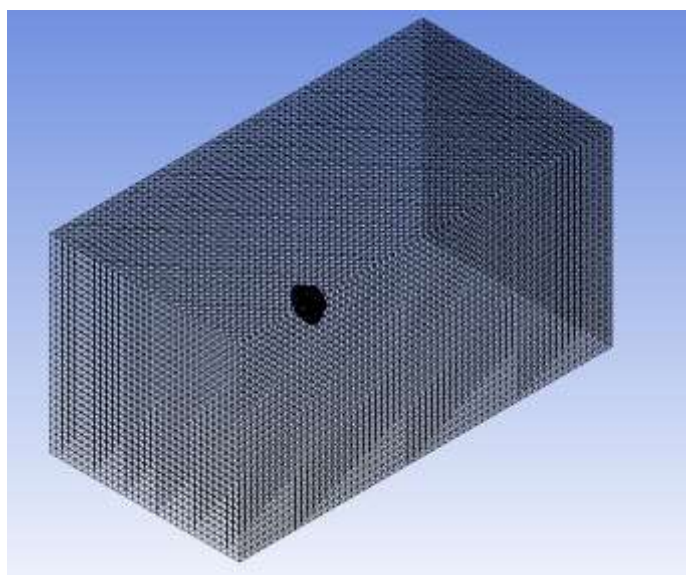


Figura 42. Mallado de la geometría.

Finalmente, se ha utilizado la herramienta “Inflation” del “Mesh Control” para realizar una malla más detallada alrededor del cuerpo a estudiar. Con esta herramienta, se ha creado una malla de 5 capas, con la primera capa de espesor a determinar y un valor de aumento de 1,2 por cada capa (Figura 43 y Figura 44).

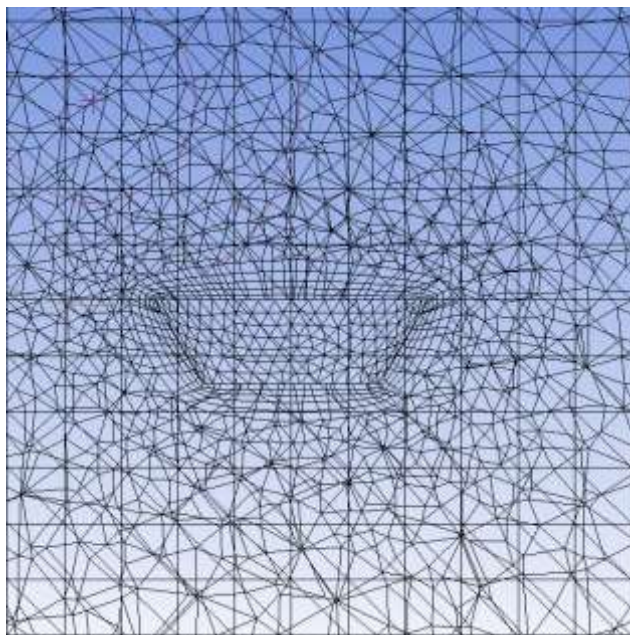


Figura 43. “Inflation” en la geometría sin soportes.

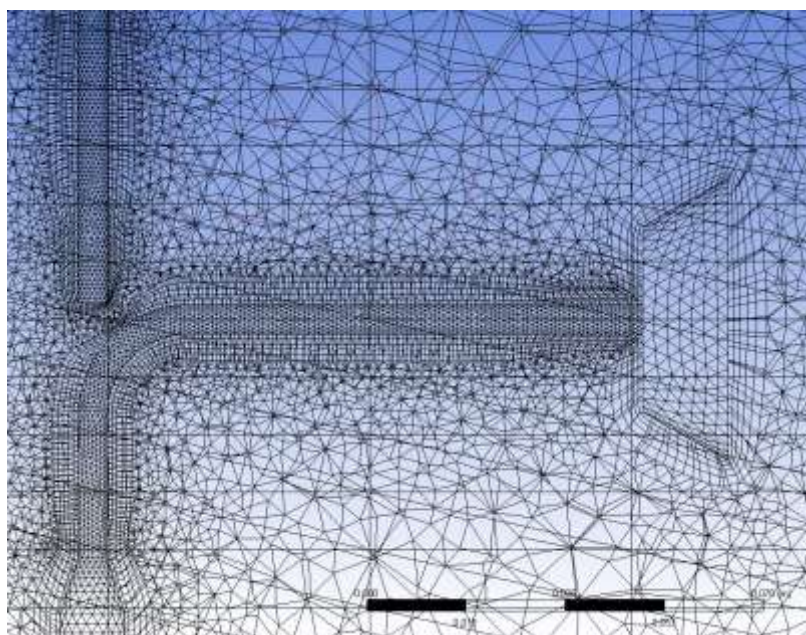


Figura 44. “Inflation” en la geometría con soportes y barra dummy.

En la Tabla 2 se representan los diferentes tamaños de malla utilizados para todas las simulaciones de la **geometría sin soportes en estado estacionario**.

| Prueba | Tamaño elementos paredes (mm) | Tamaño elementos placa plana (mm) | Inflation (mm) | Número de elementos de malla |
|--------|-------------------------------|------------------------------------|----------------|------------------------------|
| 1 | 10 | 3 | 1 | 225508 |
| 2 | 6 | 2 | 0,5 | 643922 |
| 3 | 5 | 1 | 0,1 | 1131801 |
| 4 | 5 | 0,5 | 0,1 | 1732623 |

Tabla 2. *Tamaño de malla de las diferentes partes de la geometría sin soportes.*

En la Tabla 3 se muestran los tamaños de malla y los tiempos de salto utilizados en las simulaciones en **estado transitorio de la geometría sin soportes**. Como se puede observar, para las simulaciones en estado transitorio se ha usado el mismo tamaño de malla que en la prueba 4 del estado estacionario debido a que es la configuración más óptima para obtener un resultado lo más preciso y real posible.

| Prueba | Tamaño elementos paredes (mm) | Tamaño elementos placa plana (mm) | Inflation (mm) | Número de elementos de malla | Salto de tiempo (s) |
|--------|-------------------------------|------------------------------------|----------------|------------------------------|---------------------|
| 1 | 5 | 0,5 | 0,1 | 1732623 | 0,01 |
| 2 | 5 | 0,5 | 0,1 | 1732623 | 0,001 |

Tabla 3. *Tamaño de malla y saltos de tiempo para las simulaciones en estado transitorio de la geometría sin soportes.*

En la Tabla 4 están representado los tamaños de malla de las diferentes partes de la **geometría con soportes**.

| Prueba | Tamaño elementos paredes (mm) | Tamaño elementos placa plana (mm) | Inflation (mm) | Número de elementos de malla |
|--------|-------------------------------|------------------------------------|----------------|------------------------------|
| 1 | 10 | 3 | 1 | 458105 |
| 2 | 6 | 2 | 0,5 | 746678 |
| 3 | 5 | 1 | 0,1 | 1600692 |
| 4 | 5 | 0,5 | 0,1 | 3724581 |

Tabla 4. Tamaño de malla de las diferentes partes de la geometría con soportes.

En la Tabla 5 se muestran los tamaños de malla y los tiempos de salto utilizados en las simulaciones en **estado transitorio de la geometría con soportes**. Como en el caso anterior, se ha utilizado la malla de la prueba 4 para realizar los cálculos en estado transitorio, ya que, es la malla con mejor resolución y la que asegura un mejor resultado.

| Prueba | Tamaño elementos paredes (mm) | Tamaño elementos placa plana (mm) | Inflation (mm) | Número de elementos de malla | Salto de tiempo (s) |
|--------|-------------------------------|------------------------------------|----------------|------------------------------|---------------------|
| 1 | 5 | 0,5 | 0,1 | 3724581 | 0,01 |
| 2 | 5 | 0,5 | 0,1 | 3724581 | 0,001 |

Tabla 5. Tamaño de malla y saltos de tiempo para las simulaciones en estado transitorio de la geometría con soportes.

Esta variación progresiva del tamaño de la malla es debido a un estudio de convergencia, donde se busca obtener un resultado fiable. En la Figura 79 se puede ver un gráfico ejemplo de dicho estudio.

5.4. Configuración del Setup

Una vez creada la geometría, se abre el apartado de “Setup” del panel de control del Workbench. En este asistente programaremos la simulación con el estado y las propiedades del flujo.

Una vez dentro del Fluent, en el apartado “General” se ha seleccionado el estado del flujo.(Figura 45).



Figura 45. Apartado “General”

Después en el apartado “Models” se ha seleccionado el modelo de turbulencia que se usara para la simulación (Figura 46). Como se ha explicado anteriormente, el modelo utilizado en estas simulaciones es el modelo SST k-omega (shear stress transport).

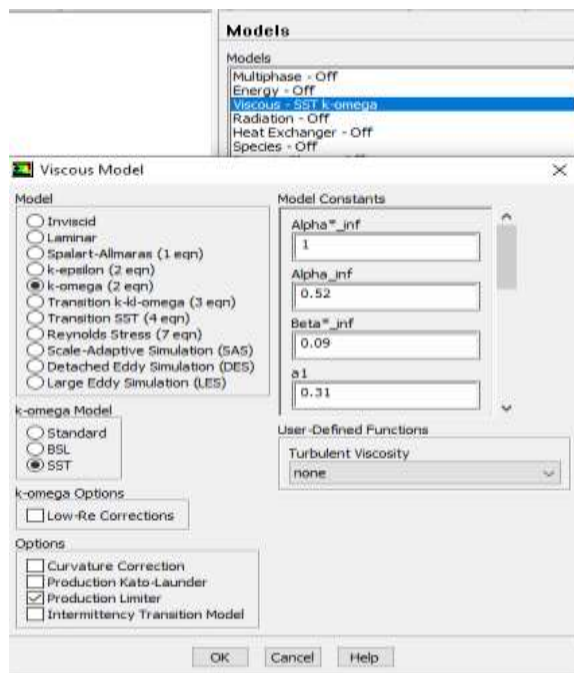


Figura 46. Apartado “Models” y modelo seleccionado.

En la sección de “Materials”, se dan las propiedades al fluido que se utilizará en la simulación. En nuestro caso, se ha utilizado el aire con las propiedades estándar del programa. Estas propiedades son de una densidad de $1,225 \text{ kg/m}^3$ y una viscosidad de $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ (Figura 47). Se ha aplicado el material en toda la zona del fluido en la sección “Cell Zone Conditions” (Figura 48).

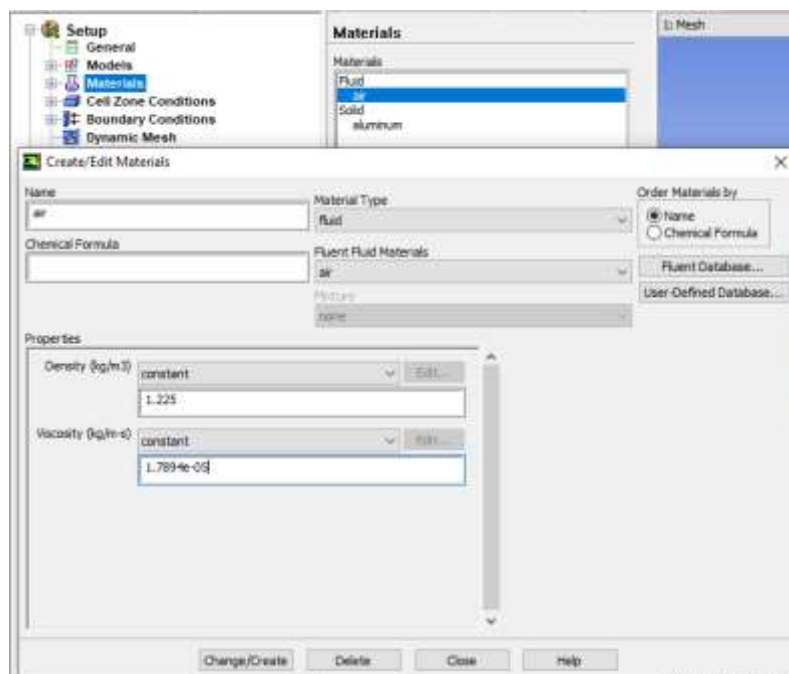


Figura 47. Fluido seleccionado y propiedades.

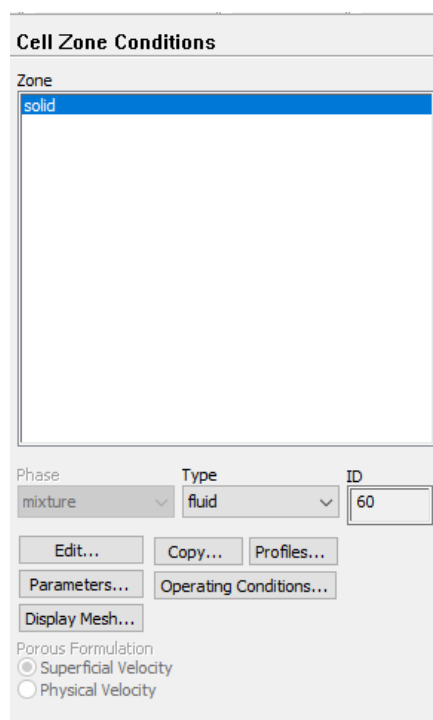


Figura 48. "Cell Zone Conditions"

En la sección de “Boundary Conditions” se han dado las condiciones de contorno de nuestra simulación. En este apartado se han asignado las diferentes características a las partes de la cámara de ensayo. En primer lugar, se ha definido la etiqueta “Inlet” como la entrada de flujo y se le ha dado una velocidad determinada. La etiqueta “Outlet” se la ha definido como salida de aire a una presión relativa igual a 0 (salida a la atmósfera). Las etiquetas de “Wall” y “Pared plana” se les ha asignado la condición de pared (cuerpos sólidos). Finalmente, a la etiqueta “Interior-fluid_domain” se la ha asignado como interior de la cámara de ensayo (lugar de circulación del fluido) (Figura 49).

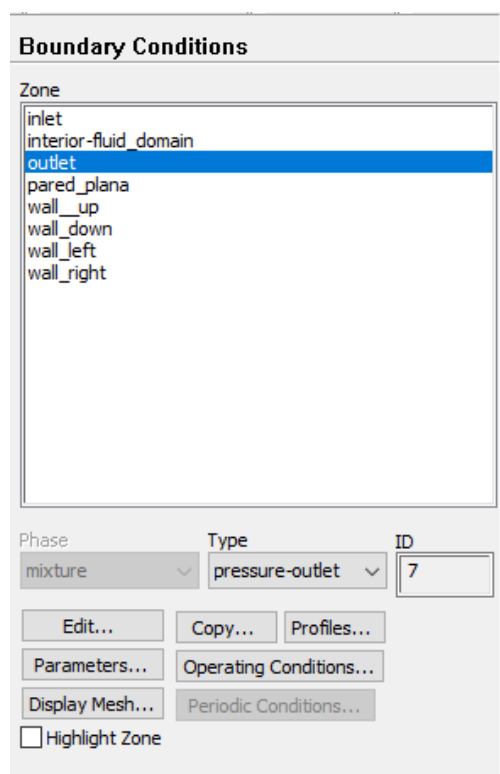


Figura 49. “Boundary Conditions”

En el apartado “Reference Values” se han definido los parámetros necesarios para el cálculo del coeficiente C_D . Se han definido el área frontal, la velocidad, la densidad y la viscosidad (Figura 50).

Reference Values

Compute from
 ▼

Reference Values

Area (m2) 0.0019635

Density (kg/m3) 1.225

Enthalpy (J/kg) 0

Length (m) 1

Pressure (pascal) 0

Temperature (K) 288.16

Velocity (m/s) 30

Viscosity (kg/m-s) 1.7894e-05

Ratio of Specific Heats 1.4

Reference Zone
 solid ▼

Figura 50. "Reference Values"

En la parte de "Solutions Methods" se selecciona el proceso iterativo que utilizara el programa. Se han elegido métodos iterativos de segundo orden para la presión y el momento. Para el resto de valores se han utilizado de primer orden (Figura 51).

Solution Methods

Pressure-Velocity Coupling

Scheme
 SIMPLE ▼

Spatial Discretization

Gradient
 Least Squares Cell Based ▼

Pressure
 Second Order ▼

Momentum
 Second Order Upwind ▼

Turbulent Kinetic Energy
 First Order Upwind ▼

Specific Dissipation Rate
 First Order Upwind ▼

Transient Formulation
 ▼

☐ Non-Iterative Time Advancement

☐ Frozen Flux Formulation

☐ Pseudo Transient

☐ High Order Term Relaxation Options...

Default

Figura 51. "Solution Methods"

En el apartado de “Solution Initialization” se ha seleccionado el método “Standard initialization” y se ha añadido la velocidad del flujo, hay que tener en cuenta que hay que determinar la dirección y el sentido del flujo (Figura 52).

Solution Initialization

Initialization Methods

☐ Hybrid Initialization

☒ Standard Initialization

Compute from

Reference Frame

☒ Relative to Cell Zone

☐ Absolute

Initial Values

Gauge Pressure (pascal)

0

X Velocity (m/s)

0

Y Velocity (m/s)

0

Z Velocity (m/s)

-30

Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)

1

Specific Dissipation Rate (1/s)

1

Initialize Reset Patch...

Reset DPM Sources Reset Statistics

Figura 52. “Solution Initialization”

Por último, en el apartado “Run Calculation” se asignan las iteraciones que se desean llevar a cabo en la simulación. Este apartado varía según el estado de la simulación, ya sea estacionario o transitorio.

Para el estado estacionario se han programado todas las simulaciones para 2000 iteraciones, aunque normalmente el resultado converge antes (Figura 53).

Para el estado transitorio se han programado 20 iteraciones por salto de tiempo. Se han programado 1000 saltos y el tiempo de salto se ha ido variando (Figura 54).

Run Calculation

Check Case... Preview Mesh Motion...

Number of Iterations: 2000 Reporting Interval: 1

Profile Update Interval: 1

Data File Quantities... Acoustic Signals... Acoustic Sources FFT...

Calculate

Figura 53. "Run Calculation" en el estado estacionario.

Run Calculation

Check Case... Preview Mesh Motion...

Time Stepping Method: Fixed Time Step Size (s): 0.01

Settings... Number of Time Steps: 1000

Options:

- ☐ Extrapolate Variables
- ☐ Data Sampling for Time Statistics

Sampling Interval: 1 Sampling Options... Time Sampled (s): 0

Max Iterations/Time Step: 20 Reporting Interval: 1

Profile Update Interval: 1

Data File Quantities... Acoustic Signals... Acoustic Sources FFT...

Calculate

Figura 54. "Run Calculation" estado transitorio.

5.5. Simulaciones a realizar

Se realizarán varias simulaciones con cada una de las diferentes geometrías. En estas simulaciones se variará la malla, el estado del flujo, el tiempo de salto y la velocidad de ensayo.

Con la **geometría sin soportes**, se llevarán a cabo en total 12 simulaciones.

Se realizarán 4 simulaciones en estado estacionario y variando solo el tamaño de la malla, manteniendo la misma velocidad de ensayo (Tabla 2).

Se realizarán 2 simulaciones en estado transitorio y variando solo el salto de tiempo, manteniendo el mismo tamaño de malla y la misma velocidad de ensayo (Tabla 3).

Se realizarán 6 simulaciones en estado estacionario, manteniendo la misma malla en todas y variando la velocidad de ensayo (Tabla 6). La velocidad de 30 m/s es la utilizada en todas las otras simulaciones.

| Prueba | Velocidad (m/s) | Reynolds |
|--------|-----------------|----------|
| 1 | 5 | 17013 |
| 2 | 10 | 34027 |
| 3 | 15 | 51041 |
| 4 | 20 | 68055 |
| 5 | 25 | 85069 |
| 6 | 30 | 102083 |
| 7 | 35 | 119097 |

Tabla 6. Velocidades de ensayo para las diferentes simulaciones.

Con la **geometría con soportes y barra dummy**, se llevarán a cabo en total 6 simulaciones.

Se realizarán 4 simulaciones en estado estacionario y variando solo el tamaño de la malla, manteniendo la misma velocidad de ensayo (Tabla 4).

Se realizarán 2 simulaciones en estado transitorio y variando solo el salto de tiempo, manteniendo el mismo tamaño de malla y la misma velocidad de ensayo (Tabla 5).

5.6. Resultados CFD

En este apartado se expondrán los resultados obtenidos en las simulaciones CFD de las diferentes mallas y geometrías. Se expondrán los resultados de la malla 4 de la geometría sin soportes y los resultados de la malla 4 de la geometría con soportes. Posteriormente se realizarán comparaciones entre las diferentes mallas y geometrías.

5.6.1. Geometría sin soportes.

5.6.1.1. Perfiles de velocidad

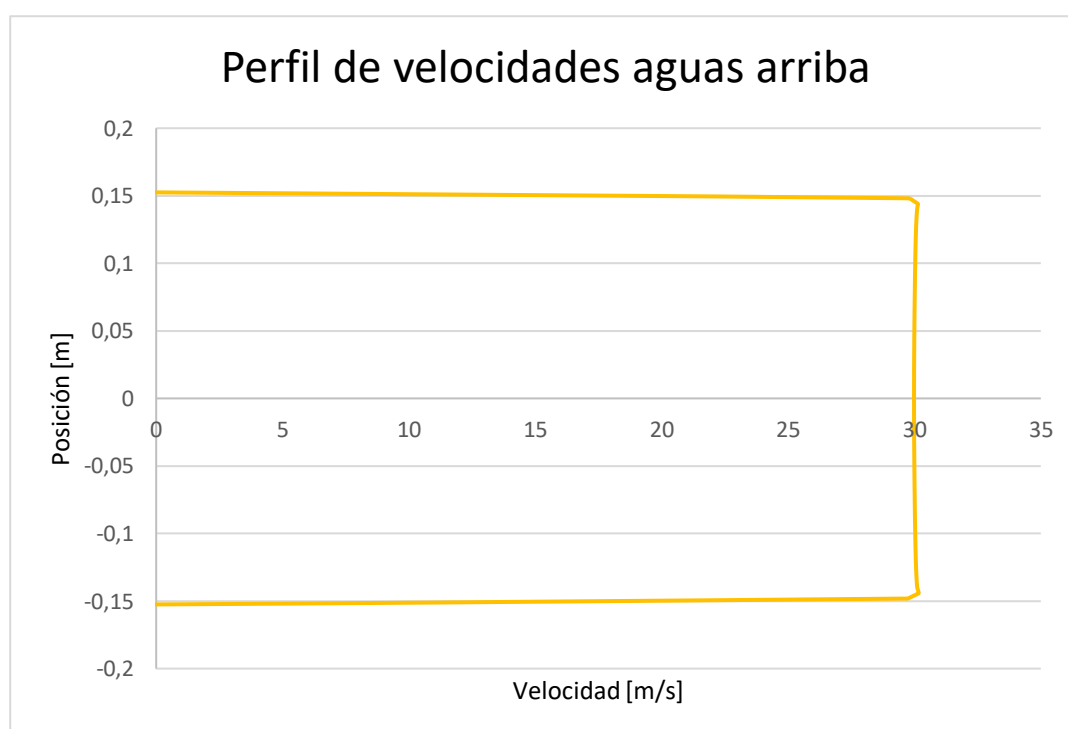


Figura 55. Perfil de velocidades aguas arriba de la malla 4 de la geometría sin soportes.

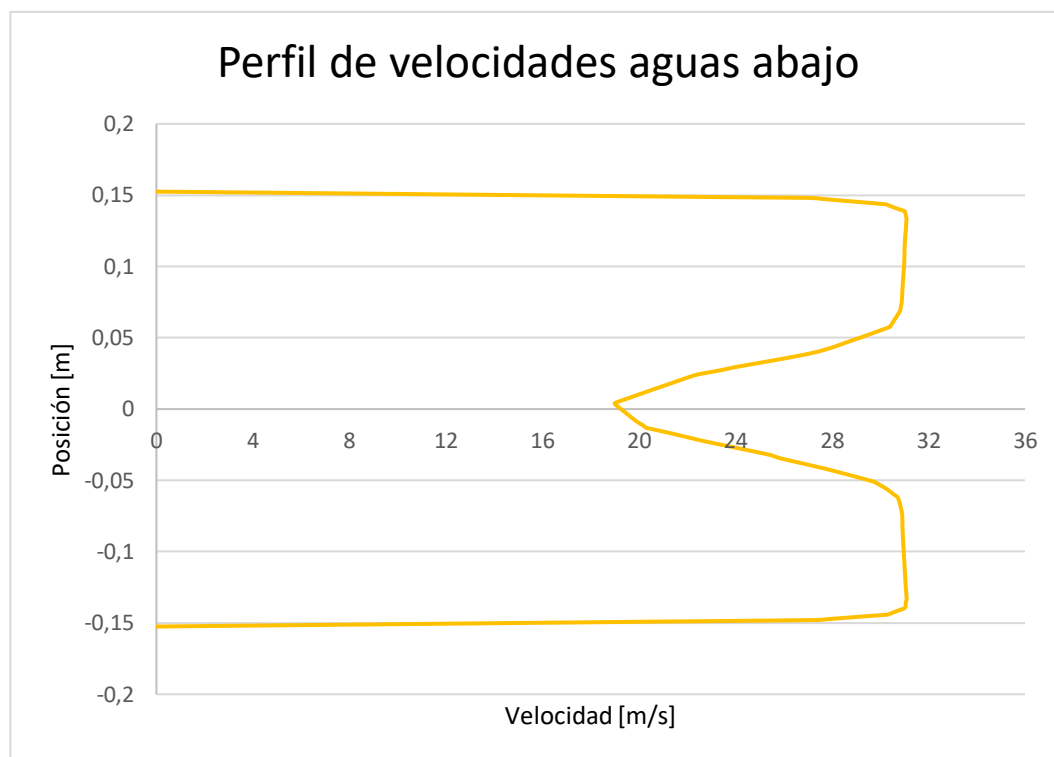


Figura 56. Perfil de velocidades aguas abajo de la malla 4 de la geometría sin soportes.

En los gráficos de las figuras 55 y 56 se han representado los perfiles de velocidad aguas arriba y aguas abajo del cuerpo a estudiar en la simulación.

En el primer gráfico, correspondiente a la velocidad aguas arriba, podemos observar como la velocidad en la pared es de 0 m/s y esta va incrementando hasta llegar a los 30 m/s, ofreciendo un perfil completamente recto a lo largo de la cámara de ensayo. Cerca de la pared observamos el gradiente de velocidades que forma parte de la capa límite. El espesor de capa límite es de tan solo 6 mm (Figura 55).

En el segundo gráfico, cerca de la pared, se da el mismo fenómeno que en el perfil aguas arriba. En esta figura, correspondiente a la velocidad aguas abajo, podemos ver claramente cómo en donde está colocada la pieza que representa la pared plana se crea un déficit de velocidad debida a la estela generada por el paso del flujo alrededor del cuerpo. Esta estela es debida a la oposición al flujo que genera la pieza haciendo disminuir la velocidad y alterando el perfil de velocidades (Figura 56).

5.6.1.2. Fuerzas y coeficientes

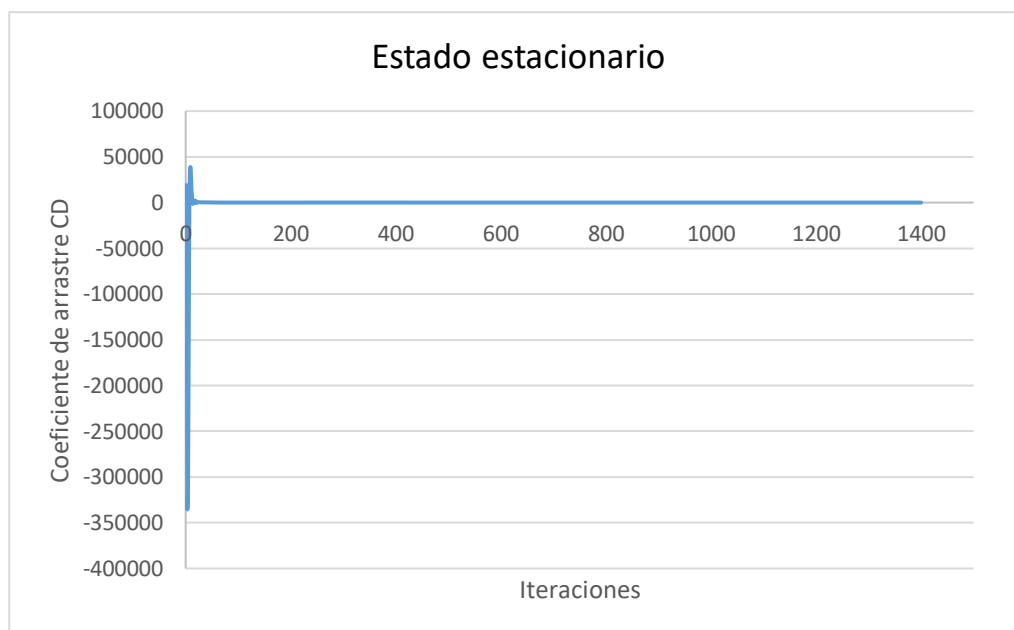


Figura 57. Gráfico de convergencia del coeficiente de arrastre C_d en régimen estacionario

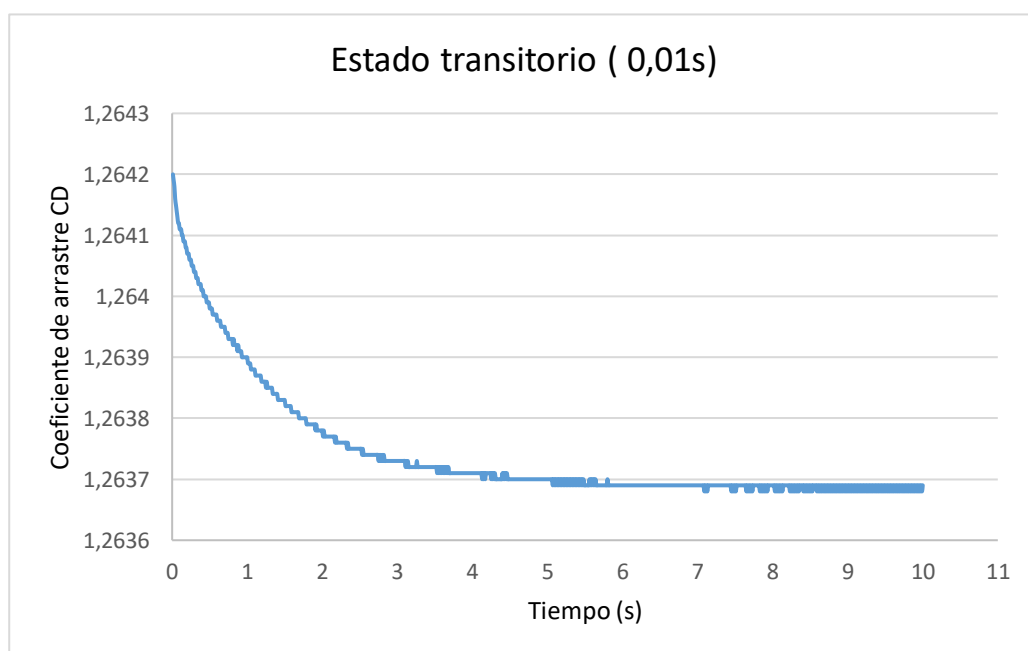


Figura 58. Gráfico de convergencia del coeficiente de arrastre C_d en régimen transitorio (0,01s)

En la Figura 57 está representado un gráfico de convergencia del coeficiente de arrastre frente las iteraciones en estado estacionario. Al principio se observan unos máximos y unos mínimos que acaban estabilizando (20 iteración) y van convergiendo hacia el valor correcto. Después de 1400 iteraciones llegamos al valor final de 1,2642.

En la Figura 58 está representado un gráfico de convergencia del coeficiente de arrastre frente el tiempo, por lo tanto, en régimen transitorio. El salto de tiempo para dicho gráfico es de 0,01 segundos por salto y podemos ver como se obtiene un valor final de 1,2637.

En cuanto al coeficiente de sustentación, como ya se comentó anteriormente en el apartado *Coefficientes adimensionales de fuerzas*, es despreciable debido a la forma y posición de nuestra geometría.

Las fuerzas obtenidas en estas simulaciones son de 1,3683 y 1,3677 (N) respectivamente para cada configuración. Estas fuerzas nos la proporciona el programa directamente y si calculamos los coeficientes con estas fuerzas obtenemos los valores de C_D mencionados anteriormente.

5.6.1.3. Gráficos de la simulación

Gráficos de presión

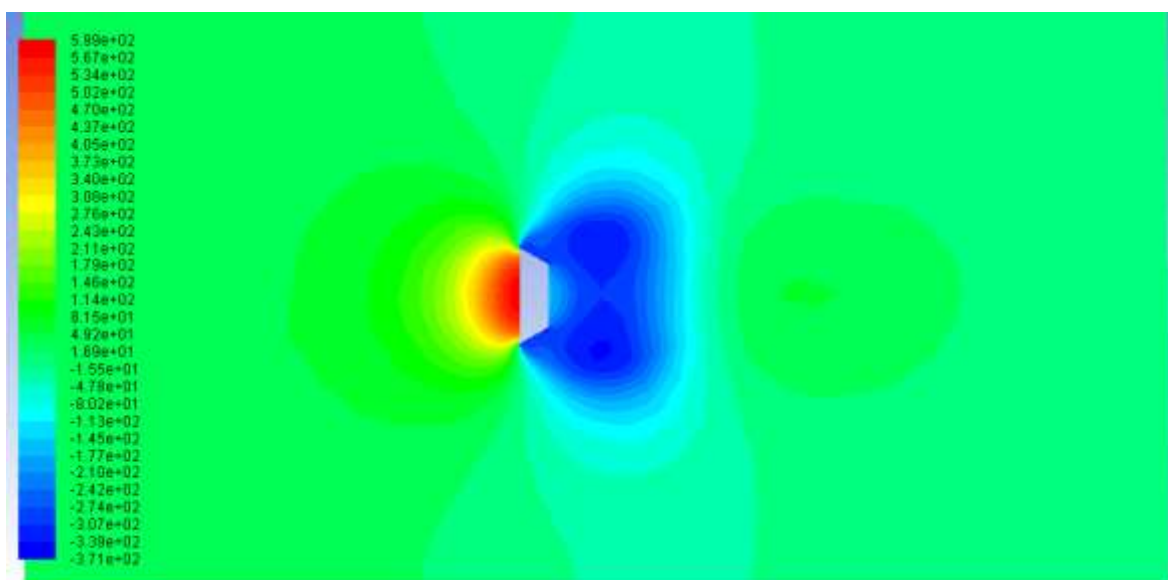


Figura 59. Contornos de presión (Pa) de la geometría sin soportes.

En este gráfico de presiones, se puede distinguir claramente como la presencia del cuerpo genera cambios de presión en el flujo. El fluido se dirige frontalmente hacia la placa plana y choca contra ella generando una gran presión sobre toda la cara frontal del disco. El fluido se desacelera y rodea la placa y se desprende por los laterales. En la parte posterior del cuerpo, debido al desprendimiento de la capa se generan turbulencias que producen una disminución de la presión y de la velocidad (Figura 59).

Gráficos de velocidad

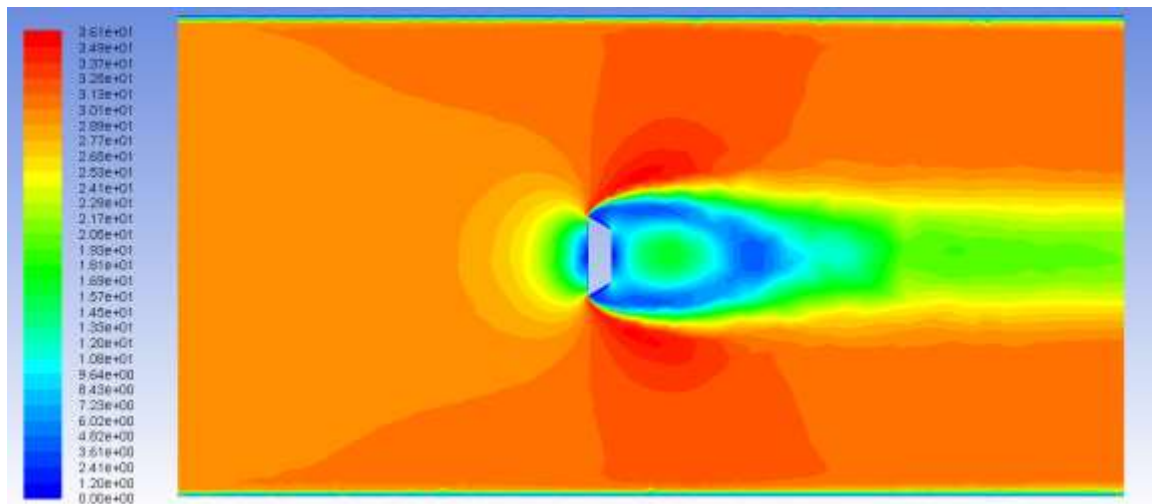


Figura 60. Contornos de velocidad (m/s), de la geometría sin soportes.

En la Figura 60 está representado un gráfico de la velocidad en las diferentes partes de la caja. Como podemos ver en la entrada la velocidad es de 30 m/s en toda la cámara, a medida que esta va avanzando, vemos cómo va aumentando por los laterales debido a la placa plana situada en el medio. Esta placa genera perturbaciones en el flujo y, por lo tanto, en las presiones dando lugar a una variación de la velocidad.

Al irnos moviendo por la línea central, cuando nos encontramos en una distancia cercana del cuerpo, la velocidad va disminuyendo de manera gradual hasta llegar a 0 m/s en la superficie frontal del disco mientras la presión va adquiriendo su máximo. Se puede ver como en toda la superficie del cuerpo la velocidad es nula, quedando así demostrada la condición de no-deslizamiento. Sobre la superficie del cuerpo se produce un gran gradiente de velocidad que conocido como capa límite (Figura 61).

También se ve claramente como los extremos del disco es donde se da la máxima velocidad (36,13 m/s) y una presión mínima debido a que es donde se produce el desprendimiento de la capa límite. Viendo estos datos, podemos ver que existe una relación inversa de la velocidad y la presión, demostrando que en un fluido no-viscoso y/o irrotacional, la velocidad aumenta conforme la presión disminuye y viceversa. Detrás del cuerpo y en la capa límite se puede ver como no se cumple esta

condición ya que se trata de una zona de flujo rotacional y por tanto la velocidad como la presión son ambos de valores bajos.

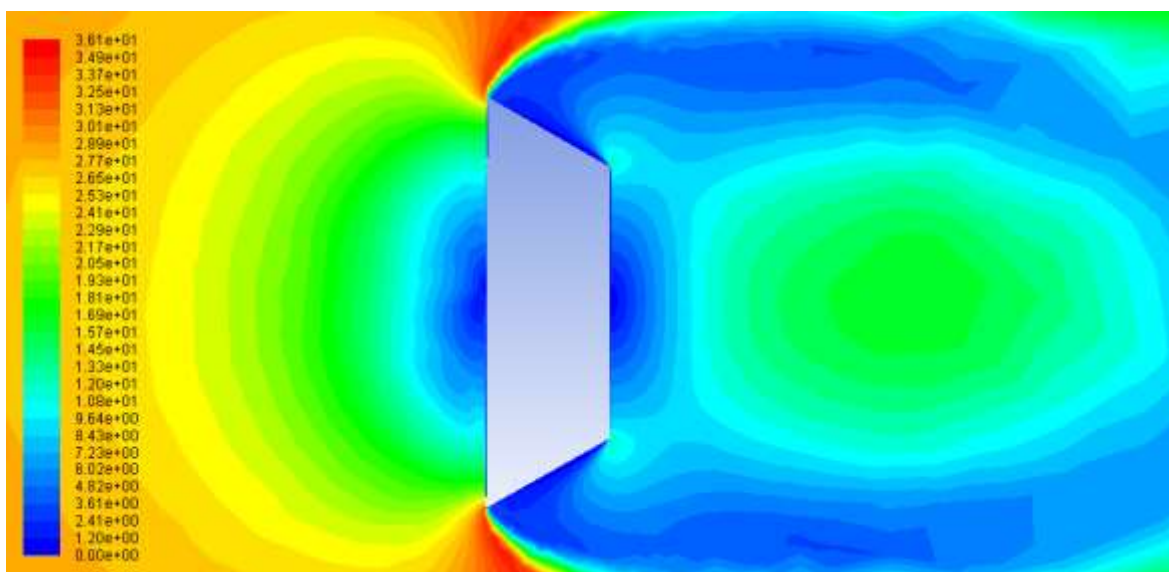


Figura 61. Contornos de velocidades (m/s), alrededor de la placa plana.

En una pared plana el flujo choca justo en el centro de esta y se divide en dos, separándose hacia arriba y hacia abajo. En los extremos del cuerpo ocurre el desprendimiento de la capa límite, independientemente del tipo de flujo. Cuando un fluido se separa de un cuerpo, forma una región separada entre el cuerpo y el flujo del fluido. Esta región de baja presión detrás del cuerpo, donde ocurre la recirculación y el flujo de vuelta, se llama región separada (Figura 62). Los efectos de la separación de flujo se sienten lejos corriente abajo en forma de velocidad reducida (Figura 56). La región de flujo atrás del cuerpo donde se sienten los efectos del cuerpo sobre la velocidad es conocida como estela (Figura 62).

La región separada termina donde las dos partes separadas de flujo vuelven a unirse, mientras que la estela continúa creciendo detrás del cuerpo hasta que el fluido vuelve a alcanzar su velocidad y el perfil de velocidad de nuevo se vuelve casi plano. En nuestra simulación la caja de trabajo es de unas dimensiones pequeñas y la estela sigue hasta la salida, por lo tanto, no se puede ver como se junta.

Se puede observar como en el centro de la región separada, la velocidad es mayor que en los laterales. En el gráfico de vectores de la Figura 63 se puede ver que el sentido de la velocidad es contrario al flujo inicial debido a la recirculación de este. Con una velocidad de alrededor de 20 m/s, choca con la parte posterior de la placa y genera una presión positiva. Contrastando este hecho con el gráfico de presiones de la Figura 59 se puede ver como la presión es mayor en la cara posterior del disco que en el resto de dicha zona.

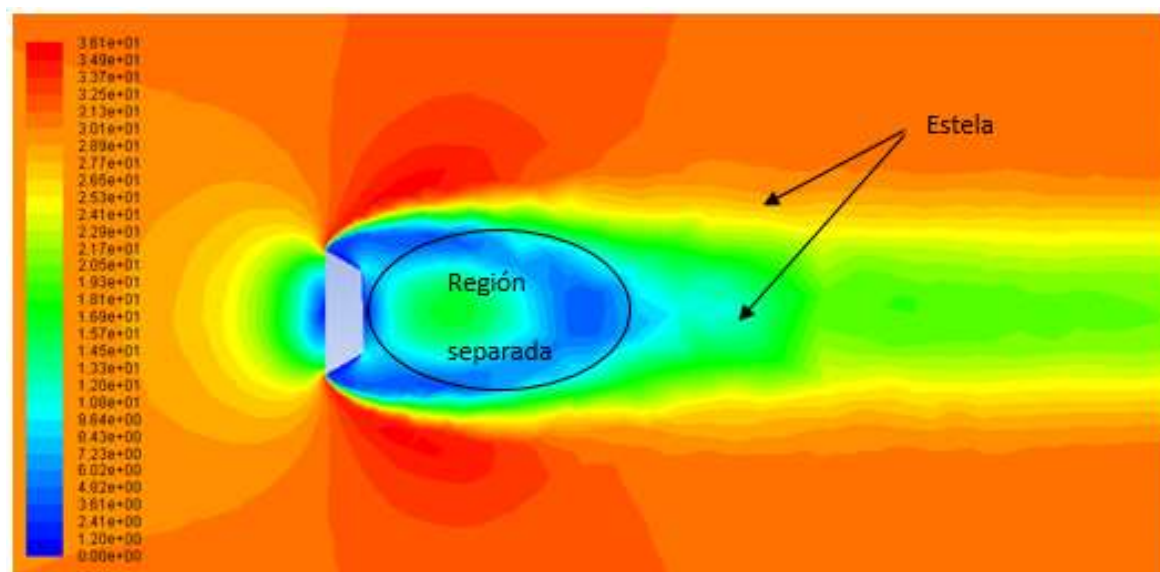


Figura 62. Región separa y estela formada por la placa plana.

En la Figura 63 se puede ver con detalle como el flujo se separa justo en el medio de la placa y sigue dos sentidos diferentes adhiriéndose completamente al cuerpo. En los extremos se puede ver con más claridad como ocurre el desprendimiento del flujo y la creación de la región separada.

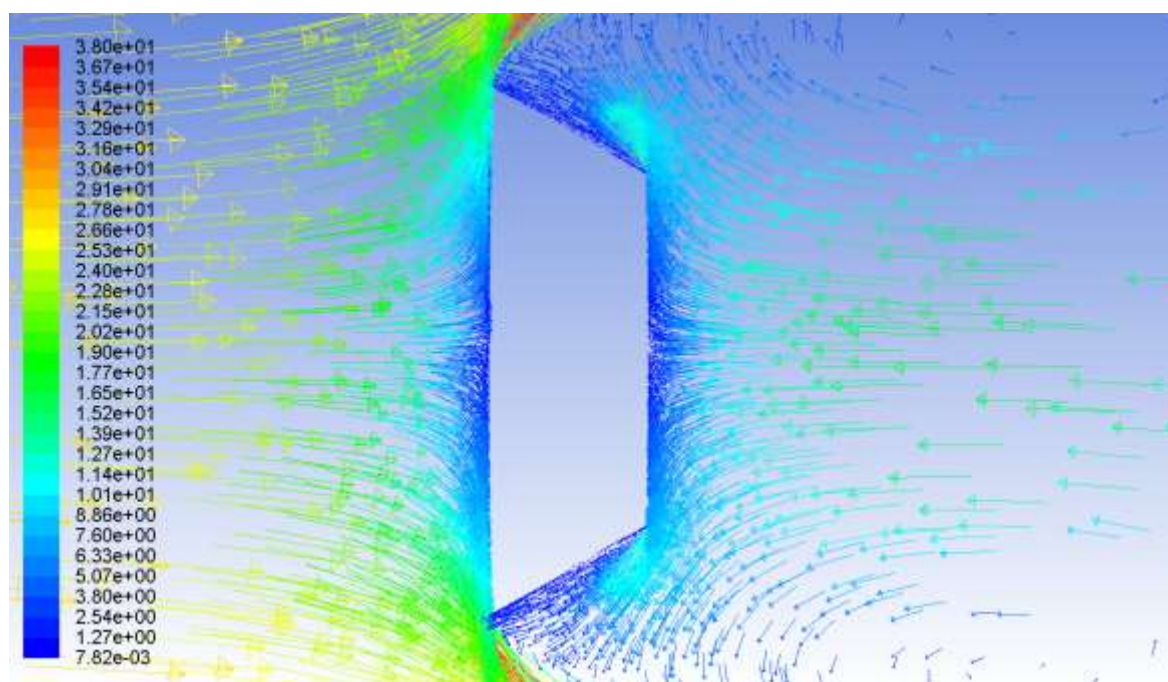


Figura 63. Vectores de velocidad (m/s), de la geometría sin soportes.

En la Figura 64 está representada la parte posterior del cuerpo, donde se genera y desarrolla la estela y la región separada. Como se ha mencionado anteriormente, en los extremos ocurre el desprendimiento de la capa límite. Una parte del flujo entra en una zona de turbulencias debido al fuerte gradiente de presión adverso que se genera y el fluido empieza a recircular en dirección contraria al flujo, topándose con la parte posterior del disco y repitiéndose el mismo acto que en la parte frontal, separándose en dos sentidos y siguiendo el contorno de la geometría. Este al llegar a los extremos de la parte posterior, se desprende y vuelve a la dirección inicial del flujo. Luego vuelve a recircular hacia atrás y de esta forma se generan unos vórtices.

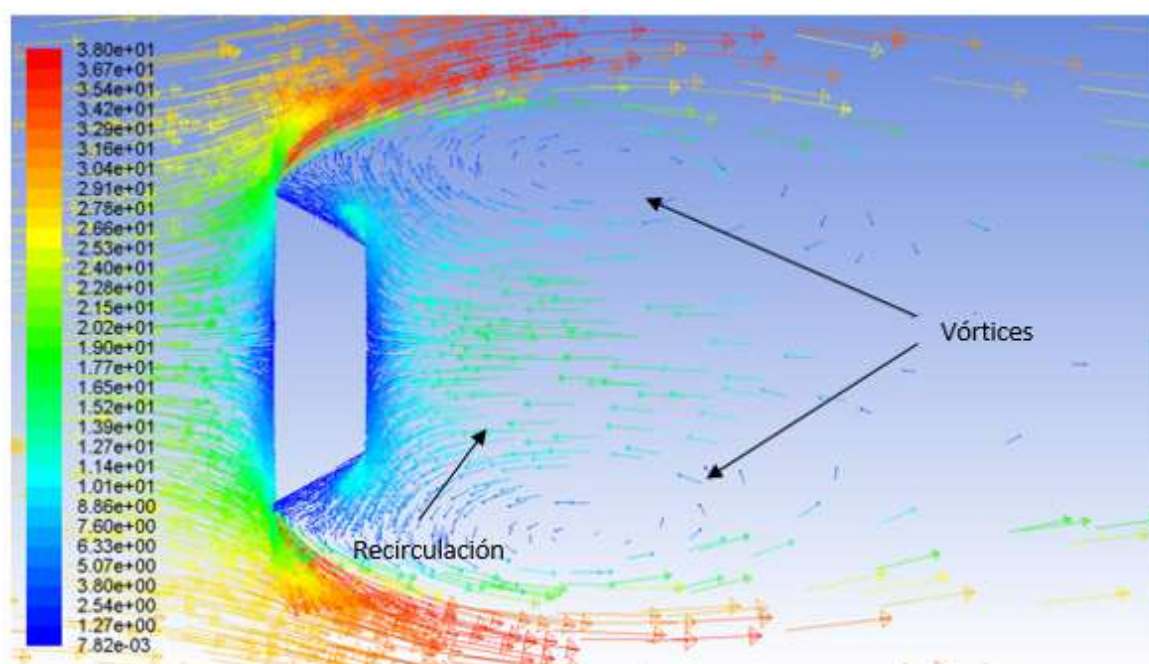


Figura 64. Vectores de velocidad (m/s), de la parte posterior de la placa sin soportes.

Gráficos de turbulencia

Con los gráficos de intensidad de turbulencia podemos ver con claridad las partes del flujo donde el fluido es rotacional. En el gráfico de la Figura 65 podemos ver como en la parte trasera de la placa es donde se genera más turbulencia. El máximo valor de turbulencia se encuentra en los vórtices. Otro detalle importante que se puede observar es como en toda la superficie del cuerpo, no hay turbulencia ya que la velocidad es nula. Podemos observar también como la turbulencia adquiere la misma forma que la estela ya que estas van ligadas.

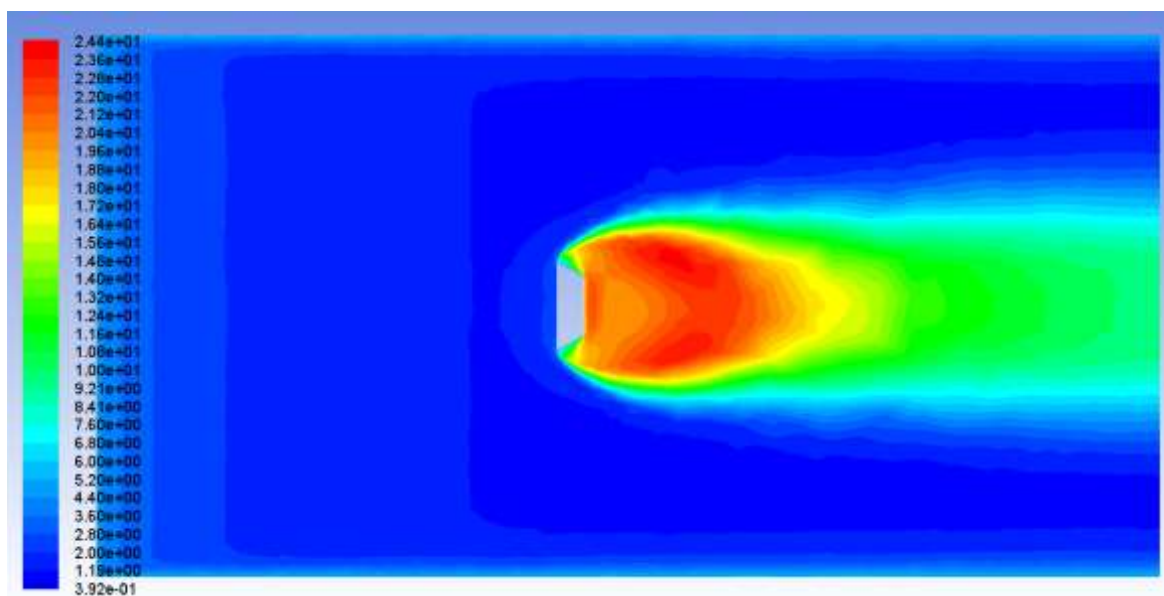


Figura 65. Contornos de intensidad de turbulencia (%), de la geometría sin soportes.

5.6.2. Geometría con soportes

5.6.2.1. Perfiles de velocidad

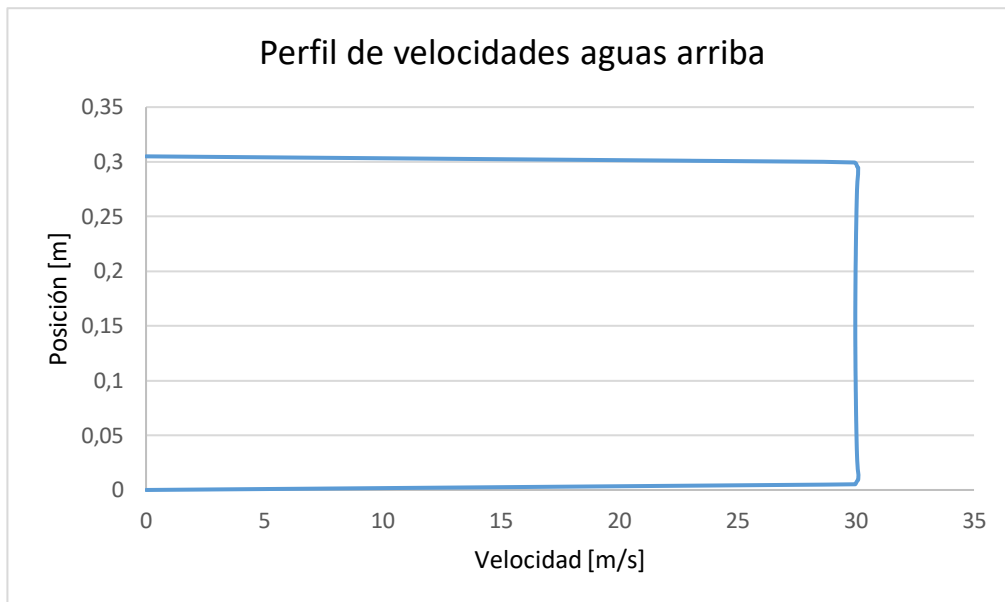


Figura 66. Perfil de velocidades aguas arriba de la malla 4 de la geometría con soportes.

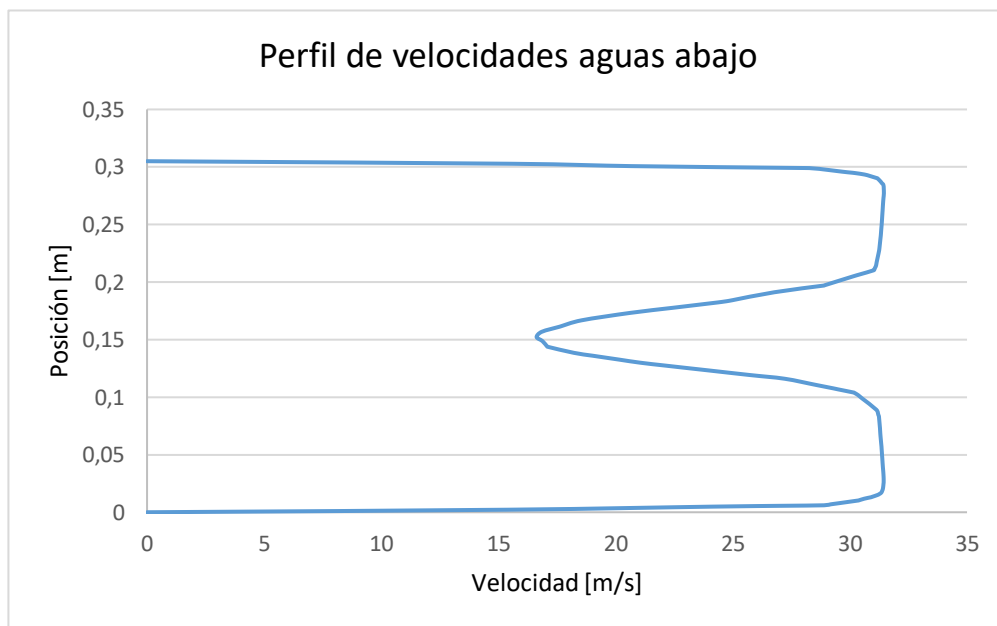


Figura 67. Perfil de velocidades aguas abajo de la malla 4 de la geometría con soportes.

En los gráficos de las figuras 66 y 67 se han representado los perfiles de aguas arriba y aguas debajo de la simulación.

En la Figura 66, correspondiente a la velocidad aguas arriba, volvemos a ver como en las paredes de la cámara la velocidad es 0 m/s. El perfil de velocidad es totalmente plano a lo largo de la cámara de ensaño. Volvemos a ver como se forma un gradiente de velocidades en la pared y el espesor de la capa límite es solo 7,8mm.

Aguas abajo, cerca de la pared, se da el mismo fenómeno que en el perfil aguas arriba. En esta figura, se puede apreciar claramente el efecto producido por el cuerpo sobre la velocidad. La estela generada hace disminuir la velocidad hasta 16,62 m/s en el centro de la caja a una distancia de 235 mm del cuerpo (Figura 67).

5.6.2.2. Fuerzas y coeficientes

Para la geometría con soportes, no se representarán los gráficos de convergencia del coeficiente de arrastre debido a que estos no se han utilizado para el cálculo del C_d ya que el valor que se obtiene directamente del programa es incorrecto. El programa solo permite introducir un área para el cálculo de coeficiente de arrastre, por lo tanto, no se puede obtener el valor de la barra dummy y de la placa plana a la vez. Para ello se tendría que hacer 2 simulaciones diferentes y calcular el coeficiente de cada por separado.

Para hacer más sencillo y rápido el proceso de cálculo, se han utilizado las fuerzas que se ejercen sobre las partes, que se obtienen de manera conjunta, para determinar el C_d . Una vez calculadas las fuerzas se ha utilizado la (Ec. 3.12) para obtener el coeficiente correcto.

| Malla | Estado | F_D Pared | F_D Dummy | C_D Pared |
|-------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 4 | Estacionario | 1,8421 | 0,4782 | 1,2604 |
| 1 | Transitorio | 1,8428 | 0,4788 | 1,2601 |

Tabla 7. Fuerzas y coeficientes de arrastre de la geometría con soportes.

En la Tabla 7 están representados los valores del coeficiente de arrastre y fuerza de la geometría con soportes. Los valores de C_d son de 1,2604 para el estado estacionario y 1,2604 para el estado transitorio. Se puede ver como se obtienen unos valores casi idénticos, por lo que se puede decir que dicho estado no influye en el resultado.

5.6.2.3. Gráficos de la simulación

Gráficos de presión

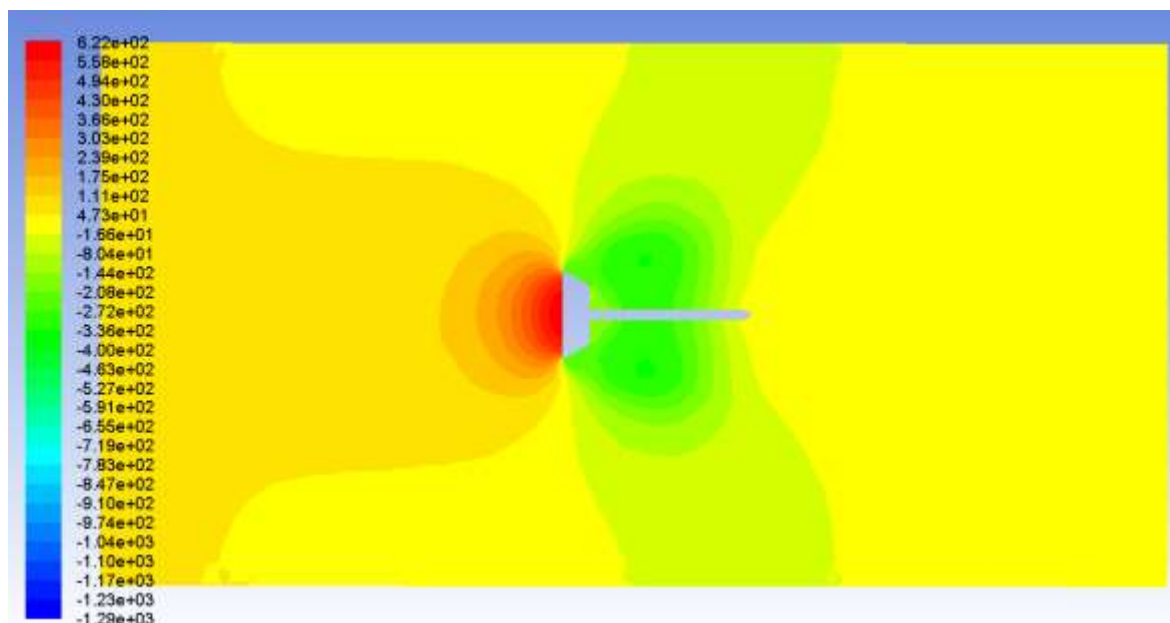


Figura 68. Contornos de presión (Pa) de la geometría con soportes, en el eje Z.

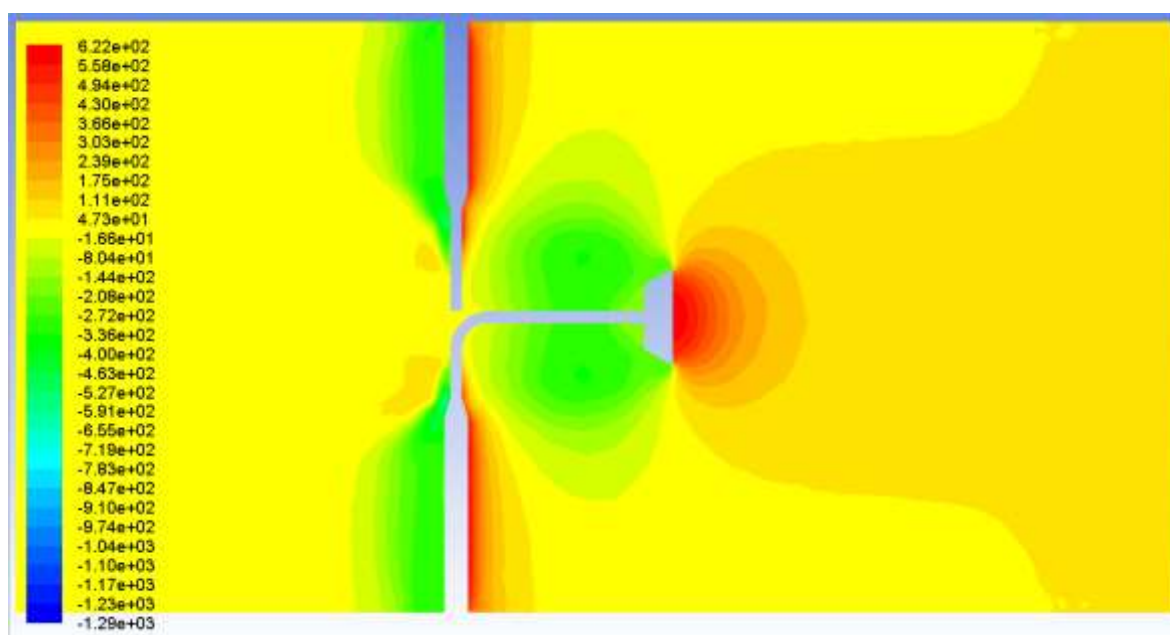


Figura 69. Contornos de presión (Pa) de la geometría con soportes, en el eje Y.

Los gráficos de las figuras 68 y 69 representan los contornos de presiones que se generan en el área de trabajo durante la simulación.

Al igual que en la simulación sin soportes, podemos observar cómo el fluido genera una gran presión sobre las superficies normales al flujo y una presión muy baja en las partes posteriores de estas. La máxima presión se da en la superficie frontal del disco y también en la superficie normal del soporte y de la barra dummy. En la Figura 68 se puede apreciar como el mapa de presiones es muy semejante al de la geometría sin soportes, con unos valores casi idénticos.

También podemos observar como el gradiente de presiones que genera el fluido sobre la barra dummy y el soporte de la placa son muy semejantes y, por lo tanto, ejercen la misma perturbación. Tratándose así de una clara evidencia de como la barra dummy ejerce su correcto funcionamiento (Figura 69).

Gráficos de velocidad

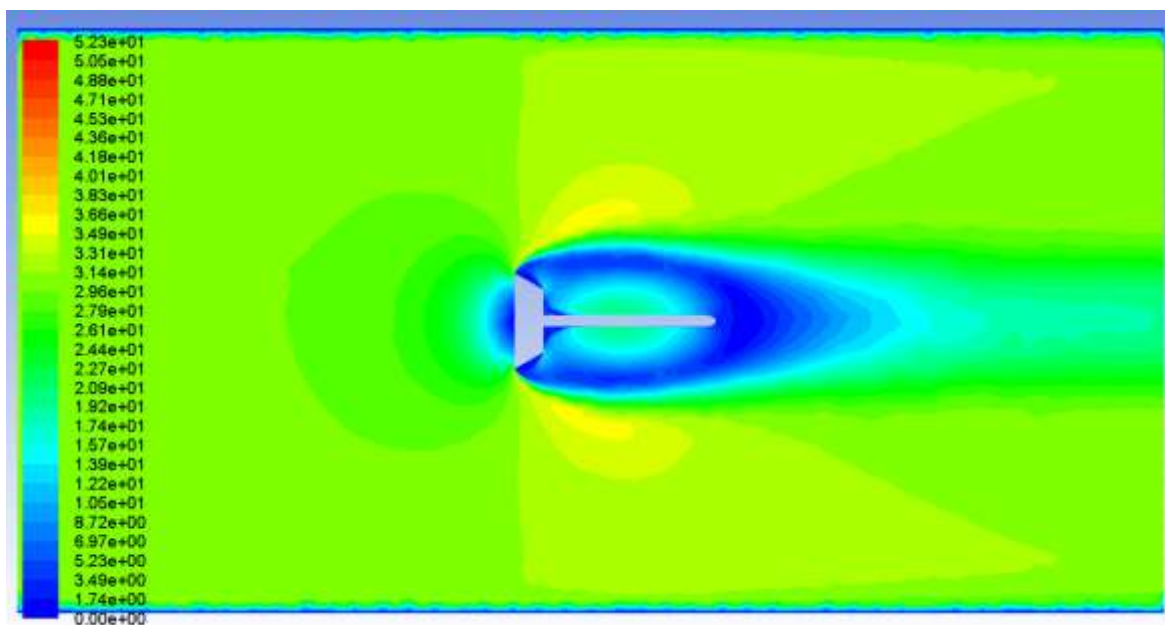


Figura 70. Contornos de velocidad (m/s), de la geometría con soportes en el eje Z.

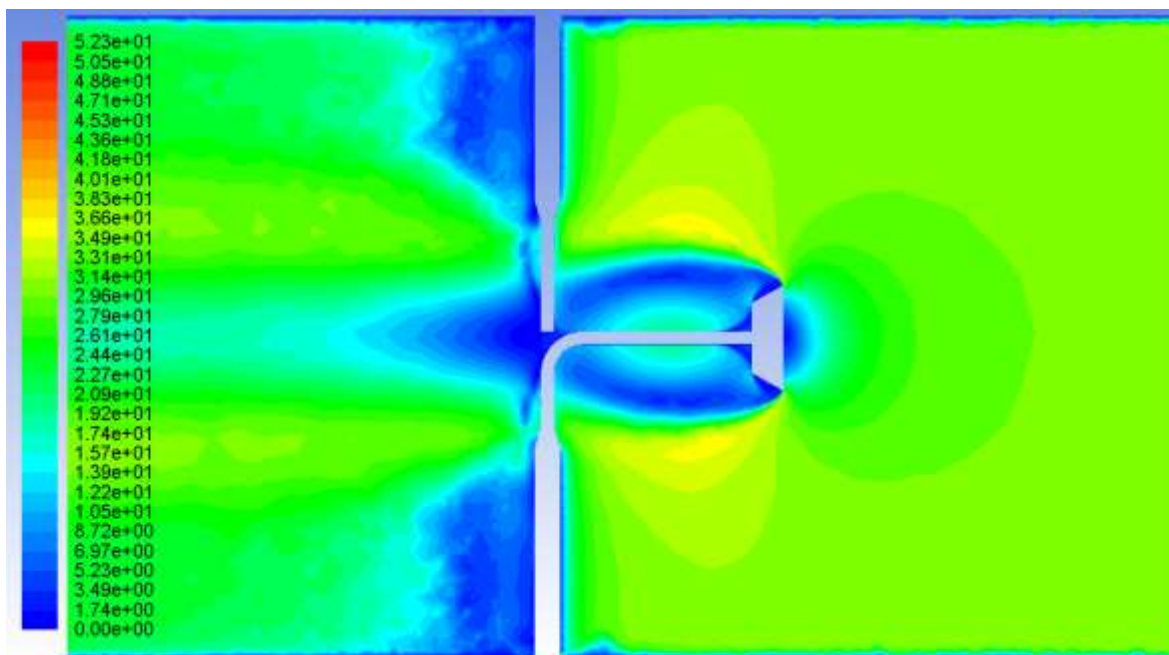


Figura 71. Contornos de velocidad (m/s), de la geometría con soportes en el eje Y.

Los gráficos de las figuras 70 y 71 representan la variación de velocidad según diferentes ejes para la geometría con soportes.

Por el contraste de colores, se puede apreciar claramente como en las paredes de la cámara de ensayo la velocidad es nula, ya que, por toda la superficie de las paredes que forman la caja el color es azul y, por lo tanto, 0 m/s.

En la Figura 70 podemos ver como la velocidad es uniforme y va disminuyendo conforme se acerca al cuerpo. Justo en el centro de la superficie frontal del cuerpo, el flujo se separa y se divide en dos. Al igual que la geometría sin soportes, sobre la superficie de todo el cuerpo la velocidad es nula y se genera un gradiente de velocidad dando lugar a la capa límite. La región separada formada por esta geometría es más amplia que la anterior debido a los soportes que generan más perturbación al flujo. En cuanto a los valores numéricos de velocidad se puede ver como son casi iguales, con una velocidad de alrededor de 36 m/s en los laterales donde ocurre el desprendimiento de la capa límite.

En la Figura 71 está representado el gráfico de velocidades desde otro plano de vista. En este gráfico se puede ver con mucha más claridad el efecto que generan sobre la velocidad los soportes y la barra dummy. Podemos ver como ambos elementos generan la misma perturbación sobre la velocidad, generando un importante déficit en la parte posterior. Observando atentamente la última parte del área de trabajo, se pueden percibir unas pequeñas estelas donde la velocidad es ligeramente menor que la inicial, estas estelas son consecuencia de dichos elementos.

También se puede ver la existencia de una capa límite por toda la superficie de los elementos (Figura 72).

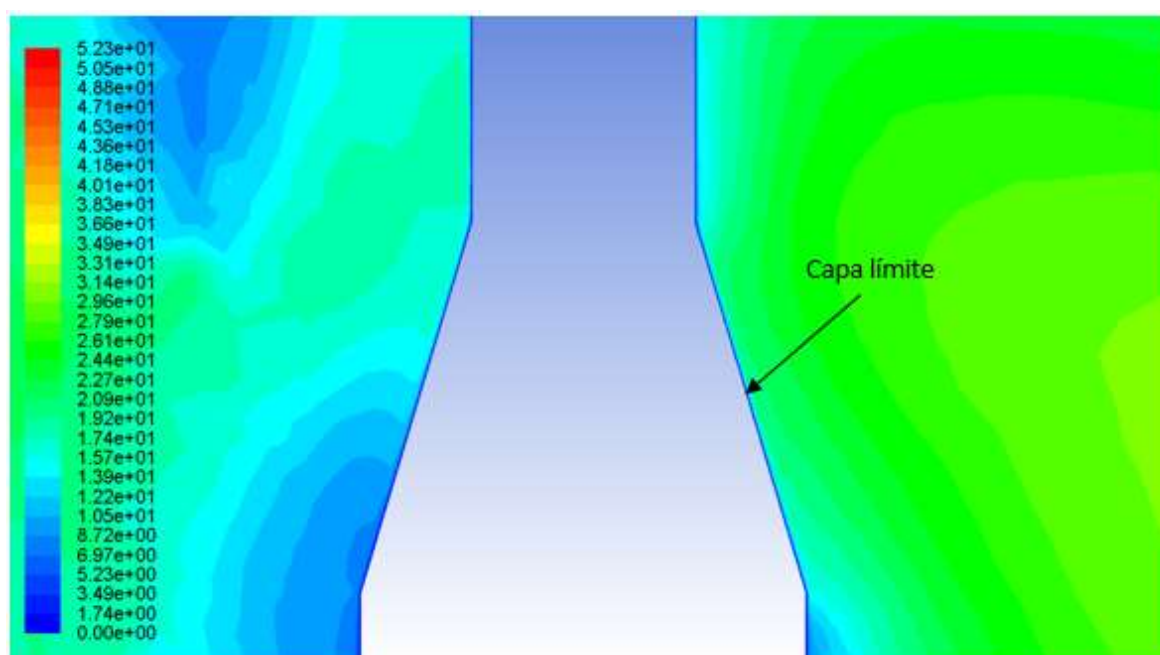


Figura 72 Capa límite del soporte.

Con los gráficos de velocidad por vectores se puede apreciar muchísimo mejor el movimiento del flujo y sus direcciones.

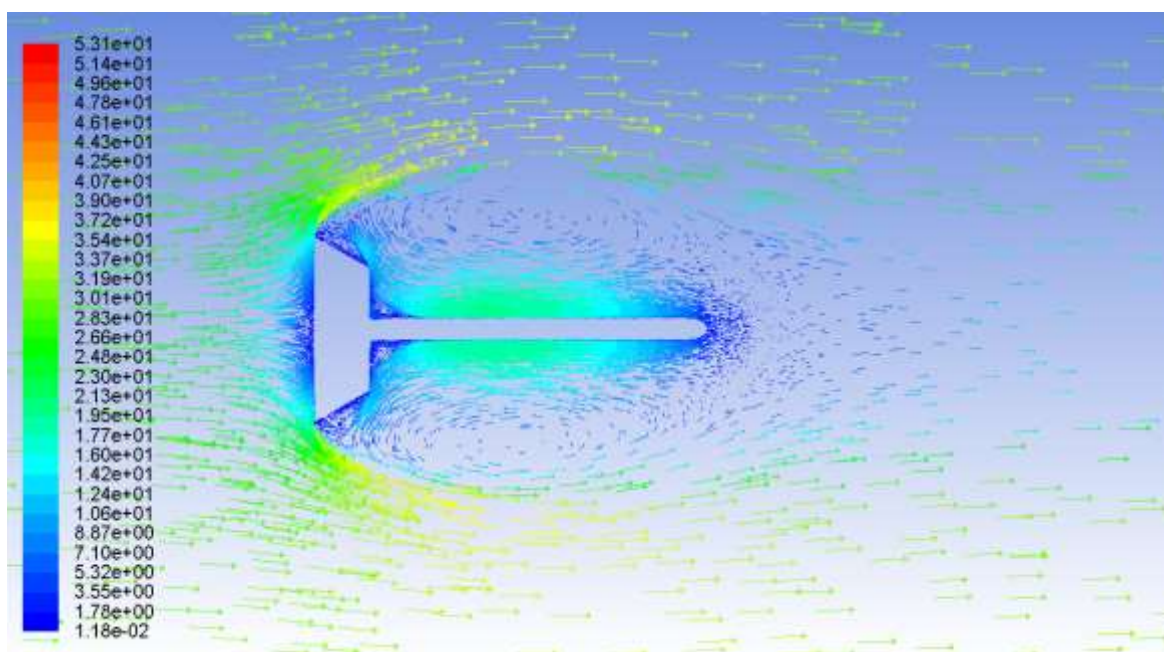


Figura 73. Vectores de velocidad (m/s), de la geometría con soportes en el plano Z.

En primer lugar, se puede observar como la forma de la estela y de los vórtices son muy parecidos a los obtenidos en la geometría sin soportes. Podemos observar el mismo proceso de creación de los vórtices y también de recirculación del fluido, debidos al desprendimiento de la capa límite y el posterior gradiente de presión adverso que se genera tras el cuerpo (Figura 73).

En segundo lugar, el hecho de la existencia de los soportes hace que se generen más vórtices. Se puede observar como el fluido recirculado se mueve pegado a la superficie del soporte, hasta llegar a un punto donde se desprende la capa límite. Este punto es muy cercano a la parte posterior de la placa y el fluido se pega a ella dejando un pequeño hueco entre el soporte y la placa donde se generan vórtices. Otro lugar donde se generan nuevos vórtices es en el desprendimiento de la capa límite de la parte posterior del disco (Figura 74).

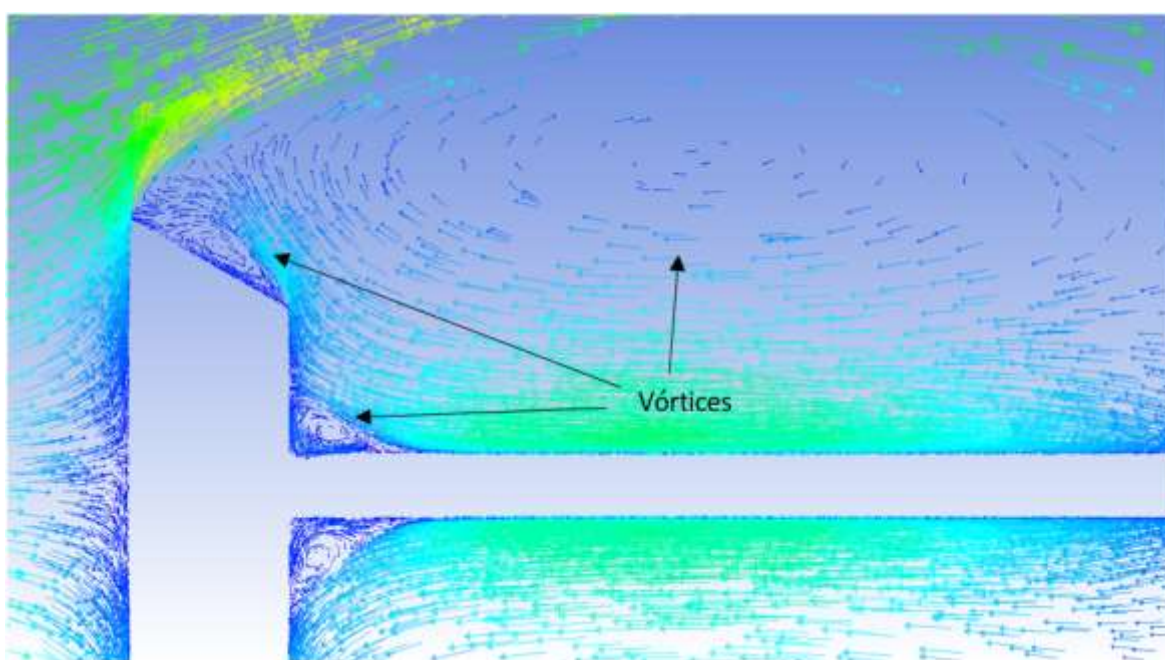


Figura 74. Vórtices generados en la geometría con soportes.

En el gráfico de la Figura 75 se puede observar el mismo fenómeno detrás de la placa, por lo tanto, nos vamos a centrar en los soportes y la barra dummy y el efecto que estas generan. Como se ha comentado anteriormente se genera una pequeña estela, pero no se llegan a generar vórtices.

En la Figura 76 podemos ver como detrás de las dos barras se genera un gradiente de presión adverso y una parte del fluido recircula alrededor de los soportes y el otro sigue fluyendo hacia la salida de la cámara.

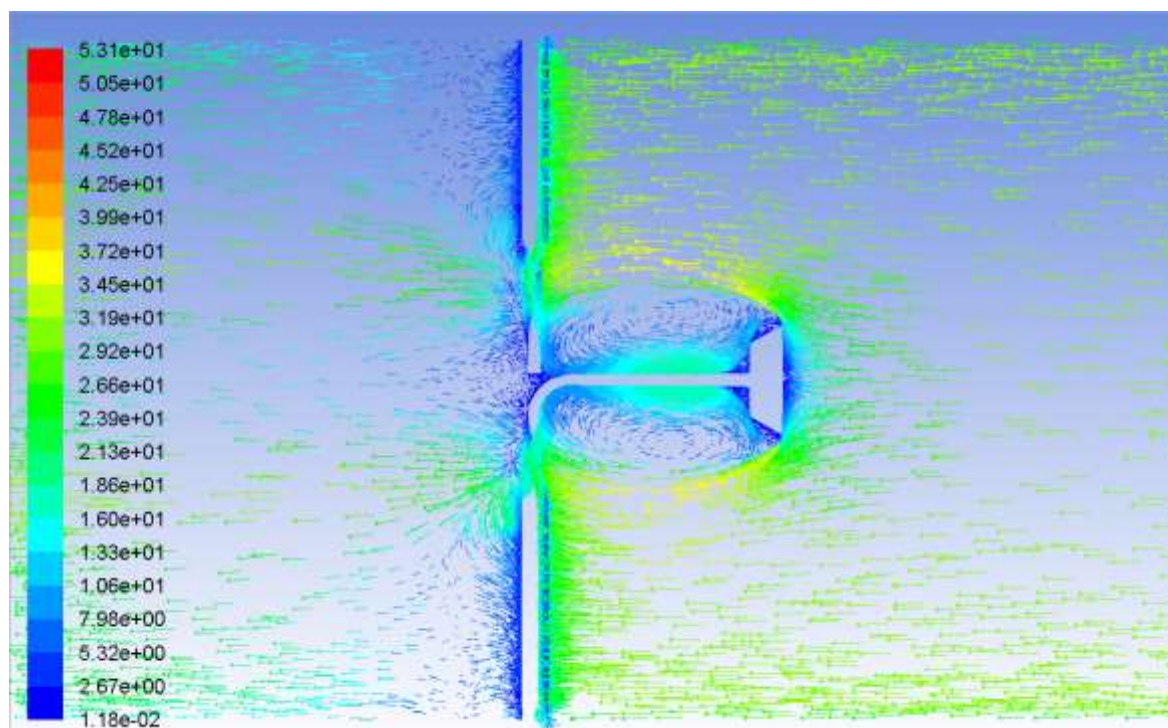


Figura 75. Vectores de velocidad (m/s), de la geometría con soportes en el plano Y.

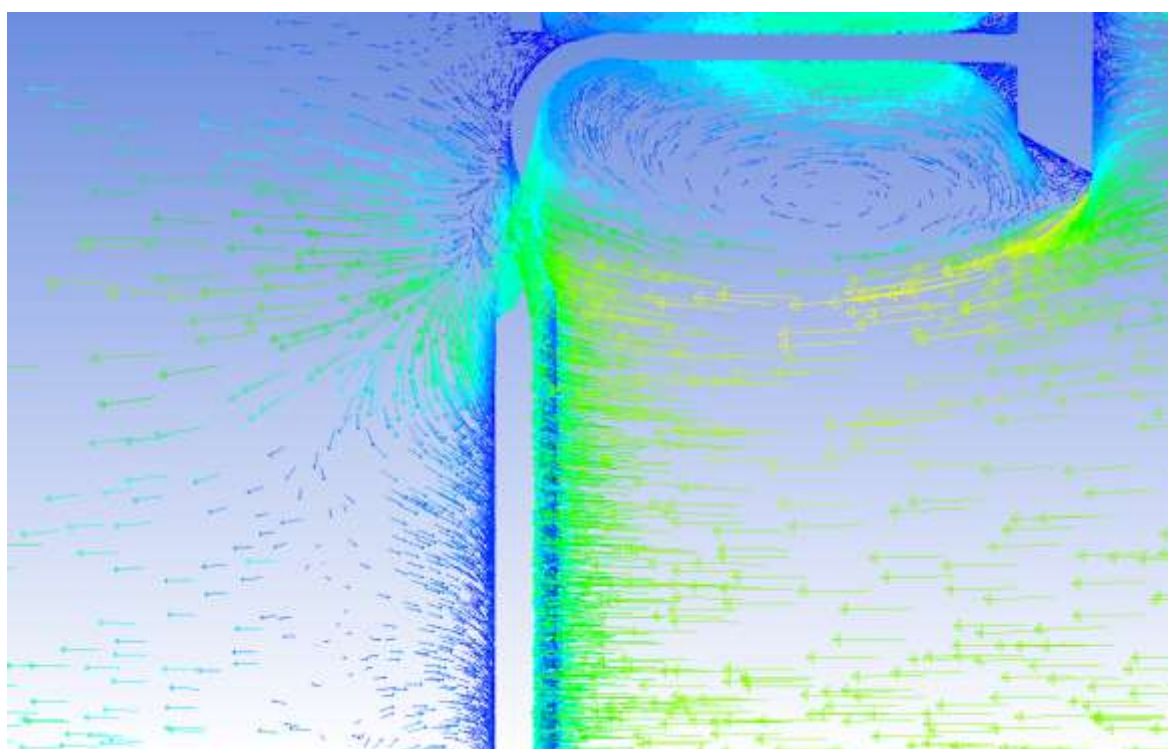


Figura 76. Vectores de velocidad (m/s) en el soporte.

Gráficos de turbulencia

Con los gráficos de intensidad de turbulencia se puede apreciar mucho mejor el lugar donde se desarrolla dicho fenómeno y se puede acabar de completar la información descrita en los gráficos de vectores de velocidad.

En la Figura 77 podemos ver como la forma y los valores de intensidad de turbulencia son muy próximos a los de la geometría sin soportes. Con los gráficos anteriores y estos, podemos decir que los soportes no alteran mucho el resultado.

En la Figura 78 se pueden ver claramente las estelas formadas por la barra dummy y el soporte. También, como ya se comentó anteriormente, la forma y los valores de la turbulencia en el soporte y la barra dummy son muy parecidos.

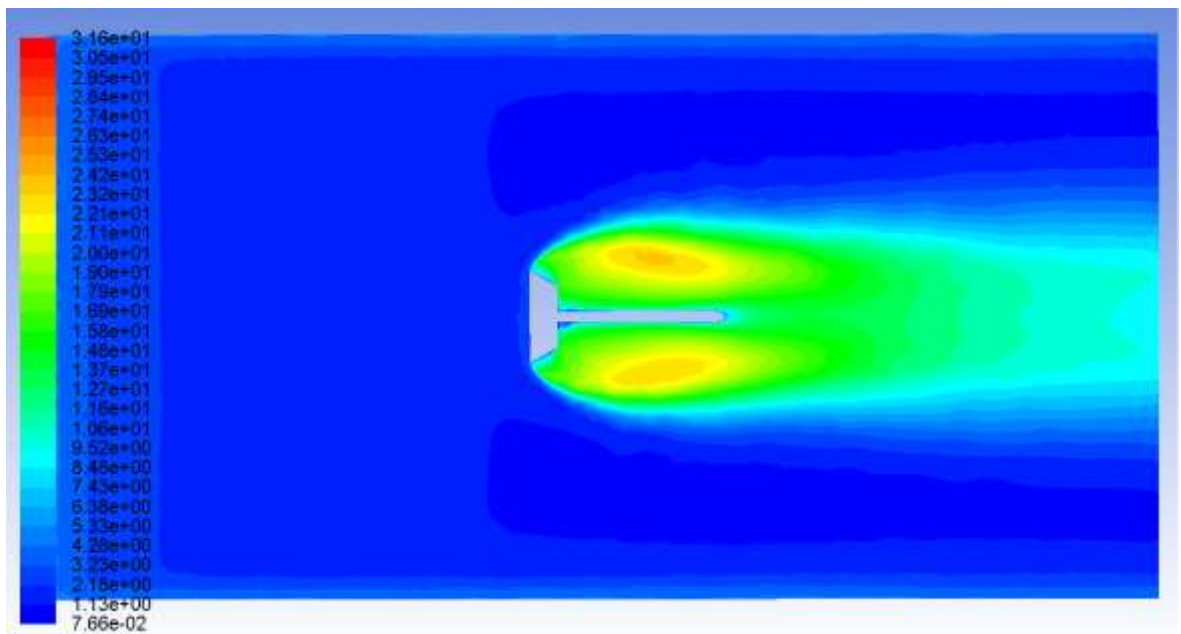


Figura 77. Contornos de intensidad de turbulencia (%), de la geometría con soportes en el plano Z.

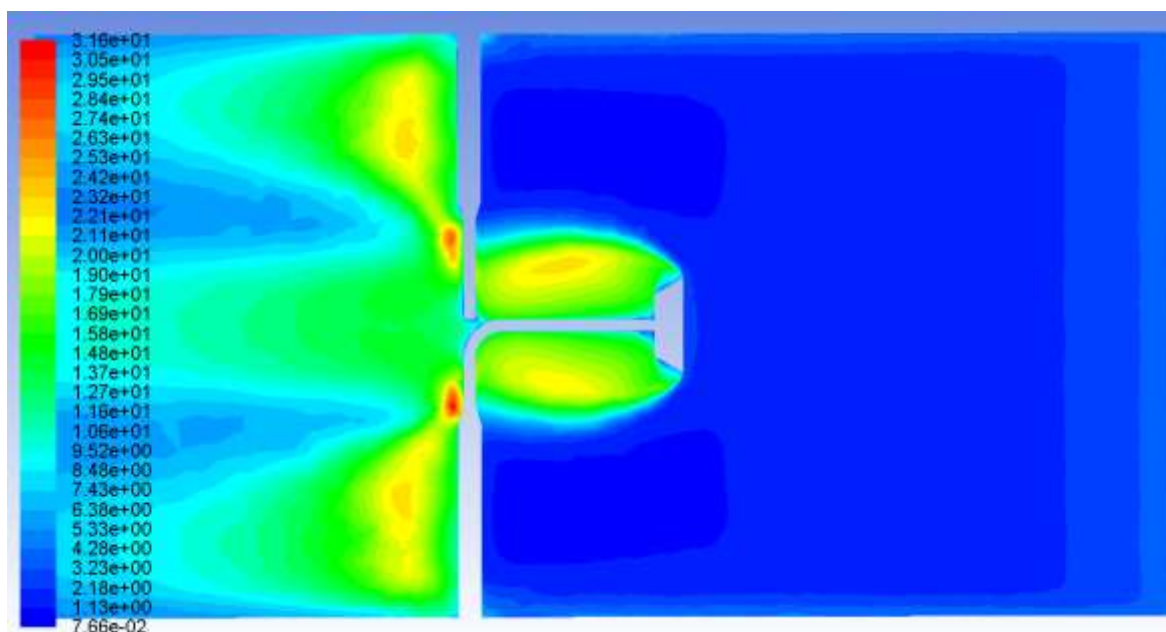


Figura 78. Contornos de intensidad de turbulencia (%), de la geometría con soportes en el plano Y.

5.6.3. Comparación de resultados

En este apartado se realizarán varias comparaciones de los resultados obtenidos. Se compararán los resultados de las diferentes mallas y geometrías usadas. También se mostrará el efecto del estado del flujo y de cómo este influye en los resultados.

5.6.3.1. Geometría sin soportes

| Prueba | Tamaño elementos paredes (mm) | Tamaño elementos placa plana (mm) | Inflation (mm) | Número de elementos de malla | Fuerza (N) | Valor C_D |
|--------|-------------------------------|------------------------------------|----------------|------------------------------|------------|-------------|
| 1 | 10 | 3 | 1 | 225508 | 1,3812 | 1,2761 |
| 2 | 6 | 2 | 0,5 | 643922 | 1,3901 | 1,2843 |
| 3 | 5 | 1 | 0,1 | 1131801 | 1,3929 | 1,2865 |
| 4 | 5 | 0,5 | 0,1 | 1732623 | 1,3683 | 1,2642 |

Tabla 8. Resultados de fuerzas y coeficientes de arrastre de la geometría sin soportes en régimen estacionario.

| Prueba | Tamaño elementos paredes (mm) | Tamaño elementos placa plana (mm) | Inflation (mm) | Número de elementos de malla | Salto de tiempo (s) | Fuerza (N) | Valor C_D |
|--------|-------------------------------|------------------------------------|----------------|------------------------------|---------------------|------------|-------------|
| 1 | 5 | 0,5 | 0,1 | 1732623 | 0,01 | 1,3677 | 1,2637 |
| 2 | 5 | 0,5 | 0,1 | 1732623 | 0,001 | 1,3677 | 1,2637 |

Tabla 9. Resultados de fuerzas y coeficientes de arrastre de la geometría sin soportes en régimen transitorio.

En las tablas 8 y 9 se han representado los resultados obtenidos en régimen estacionario y transitorio, para diferentes tamaños de malla.

En la Tabla 8 podemos observar los estudios realizados en estado estacionario. Podemos observar como los valores van convergiendo hacia el valor de 1,2642. En las pruebas 2 y 3 donde la malla es más

fin y, por lo tanto, hay mayor número de elementos los valores aumentan en vez de seguir convergiendo hacia el valor final. Este hecho puede ser debido al proceso de cálculo del programa que, al cambiar la malla y el número de elementos el coeficiente converge en otro valor totalmente diferente. Finalmente, el valor de C_d acaba convergiendo al valor apropiado. Aquí se puede ver un claro ejemplo de porque hay que realizar un estudio de convergencia de la malla ya que, como se comentó en apartados anteriores, el resultado depende completamente del número de elementos y se puede obtener unos valores incorrectos (Figura 79).

En la Tabla 9 están representados los valores del estudio en estado transitorio. Este estudio se realiza para determinar si influye o no el salto de tiempo en los resultados. Podemos observar como los datos obtenidos son muy parecidos a los del estado estacionario, con un error de tan solo 0,04% y quedando así demostrado que el régimen del flujo no influye en el coeficiente de arrastre.

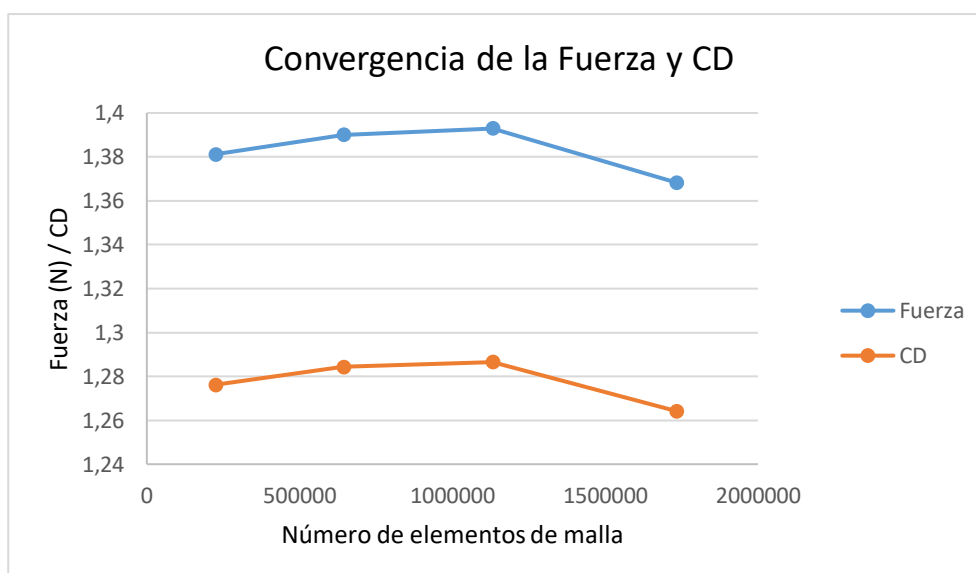


Figura 79. Gráfico de convergencia de la fuerza y el C_D .

En el gráfico de la Figura 79 podemos observar por la forma de la curva como la fuerza y el coeficiente de arrastre son directamente proporcionales.

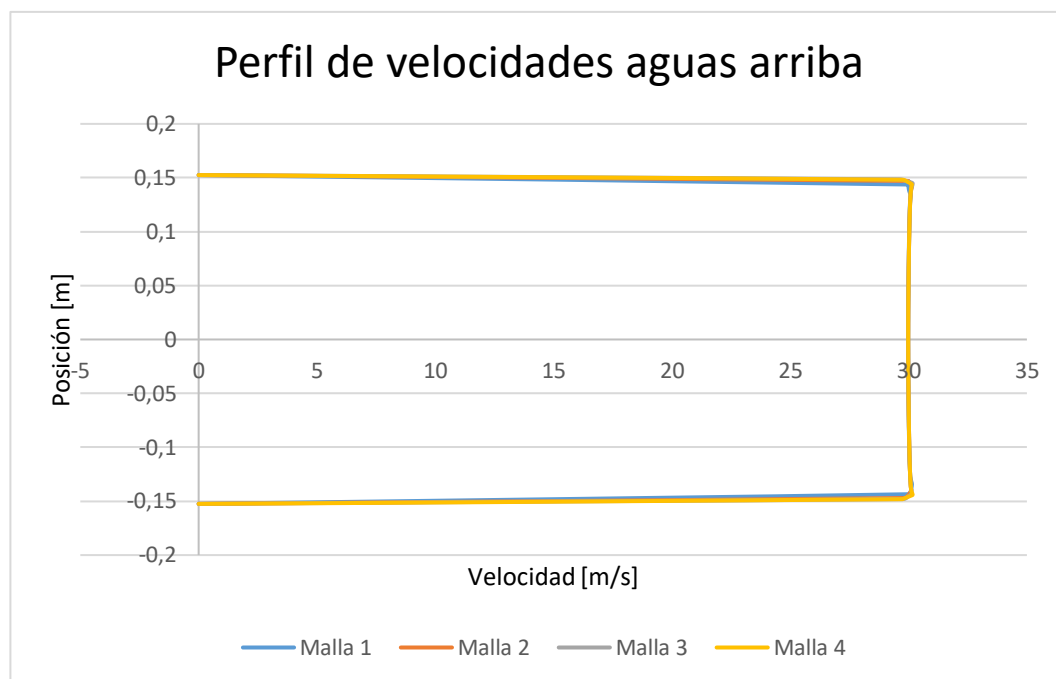


Figura 80. Perfiles de velocidad aguas arriba de las diferentes mallas de la geometría sin soportes.

Comparando los gráficos del perfil de velocidad aguas arribas podemos ver como en todas las mallas utilizadas adquieren una forma casi idéntica, apenas apreciable a simple vista. Solo se puede identificar el color azul de la malla 1 por encima del resto, ya que la capa límite de la pared es ligeramente más alta (Figura 80).

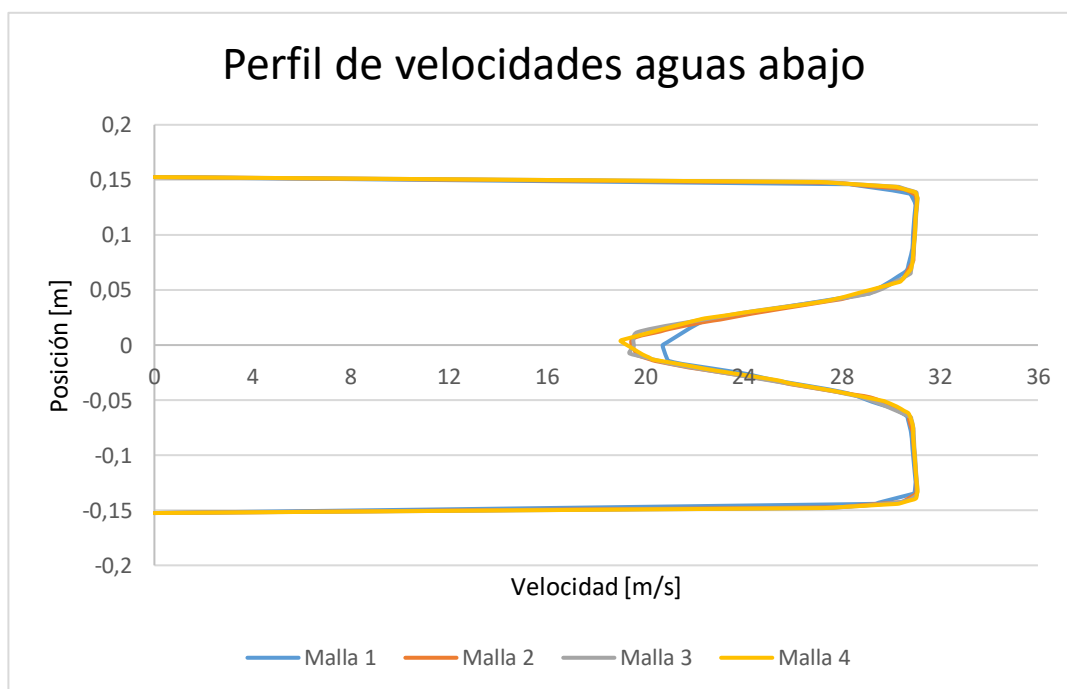


Figura 81. Perfiles de velocidad aguas abajo de las diferentes mallas de la geometría sin soportes.

En la comparación de los perfiles aguas abajo se puede observar el mismo comportamiento que en los perfiles aguas arriba. En los alrededores del disco, la forma es muy parecida en todas las mallas excepto en la primera donde se observa una pequeña diferencia en el final de la capa límite de la pared. En el centro donde se crea la estela, las mallas adquieren diferente comportamiento viéndose reflejado en la forma y velocidad en estos puntos. La malla 1 tiene una velocidad claramente por debajo de las otras, las mallas 2 y 3 tiene una forma casi idéntica y muy cercana a la malla 4. Finalmente, la malla 4 y la más precisa, es la que adquiere menor velocidad, quedando así una diferencia de 2 m/s entre la malla 1 y la malla 4 (Figura 81).

Una vez comparados los gráficos de perfiles de velocidad se puede concluir que, a partir de cierto número de elementos, el perfil adquiere una forma y velocidad casi constantes. A partir de la segunda malla los resultados son muy parecidos al resto de mallas de mayor número de elementos.

5.6.3.2. Geometría con soportes

| Prueba | Tamaño elementos paredes (mm) | Tamaño elementos placa plana (mm) | Inflation (mm) | Número de elementos de malla | F _D Pared | F _D Dummy | C _D Pared |
|--------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 10 | 3 | 1 | 458105 | 1,7131 | 0,3889 | 1,2237 |
| 2 | 6 | 2 | 0,5 | 746678 | 1,7143 | 0,3555 | 1,2557 |
| 3 | 5 | 1 | 0,1 | 1600692 | 1,8439 | 0,4716 | 1,2681 |
| 4 | 5 | 0,5 | 0,1 | 3724581 | 1,8421 | 0,4782 | 1,2604 |

Tabla 10. Resultados de fuerzas y coeficientes de arrastre de la geometría con soportes en régimen estacionario.

| Prueba | Tamaño elementos paredes (mm) | Tamaño elementos placa plana (mm) | Inflation (mm) | Número de elementos de malla | Salto de Tiempo (s) | F _D Pared | F _D Dummy | C _D Pared |
|--------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------|------------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 5 | 0,5 | 0,1 | 3724581 | 0,01 | 1,8428 | 0,4788 | 1,2601 |
| 2 | 5 | 0,5 | 0,1 | 3724581 | 0,001 | 1,8426 | 0,4787 | 1,2601 |

Tabla 11. Resultados de fuerzas y coeficientes de arrastre de la geometría con soportes en régimen transitorio.

En las Tablas 10 y 11 están representados los resultados de la geometría con soportes. En estas simulaciones hay que tener en cuenta también la fuerza que se ejerce sobre el cilindro dummy.

En la Tabla 10 se puede apreciar claramente una convergencia de los valores hacia el valor final. Se puede observar como el resultado es muy cercano al valor de la geometría sin soportes. Esto nos da a entender que el hecho de la existencia de dichos soportes no altera el resultado del coeficiente sobre la placa plana y que el cilindro dummy cumple su función correctamente, equilibrando a ambos lados las perturbaciones de dichos soportes.

En la Tabla 11 se han representado los valores obtenidos en las simulaciones en estado transitorio. Se ha obtenido un resultado igual al de las simulaciones en estado estacionario en ambas pruebas.

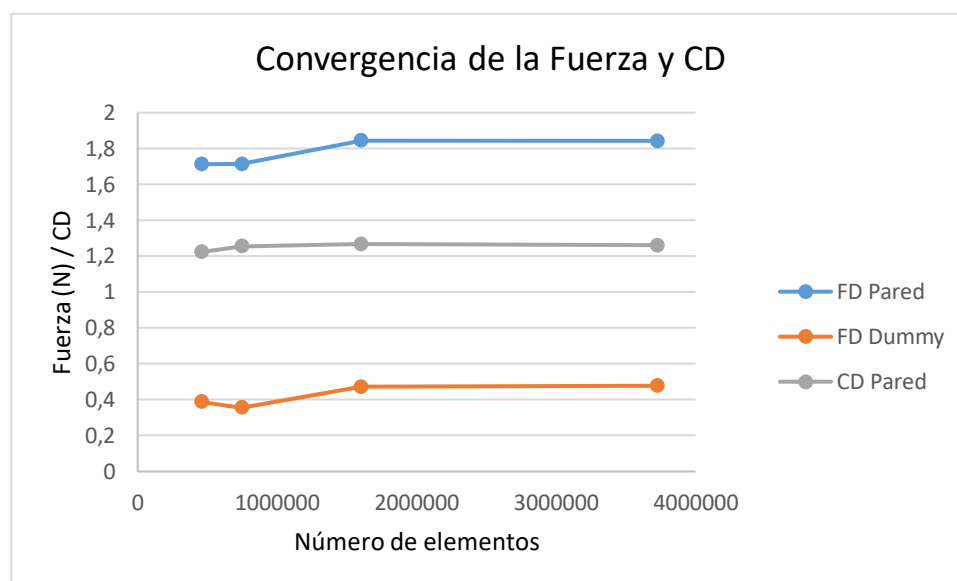


Figura 82. Gráfico de convergencia de la fuerza y el C_D .

En el gráfico de la Figura 82 se representa la convergencia de la fuerza y del coeficiente de arrastre de las pruebas en estado estacionario de la geometría con soportes. Podemos ver como a partir de la malla 3 el resultado tiene muy poca variación.

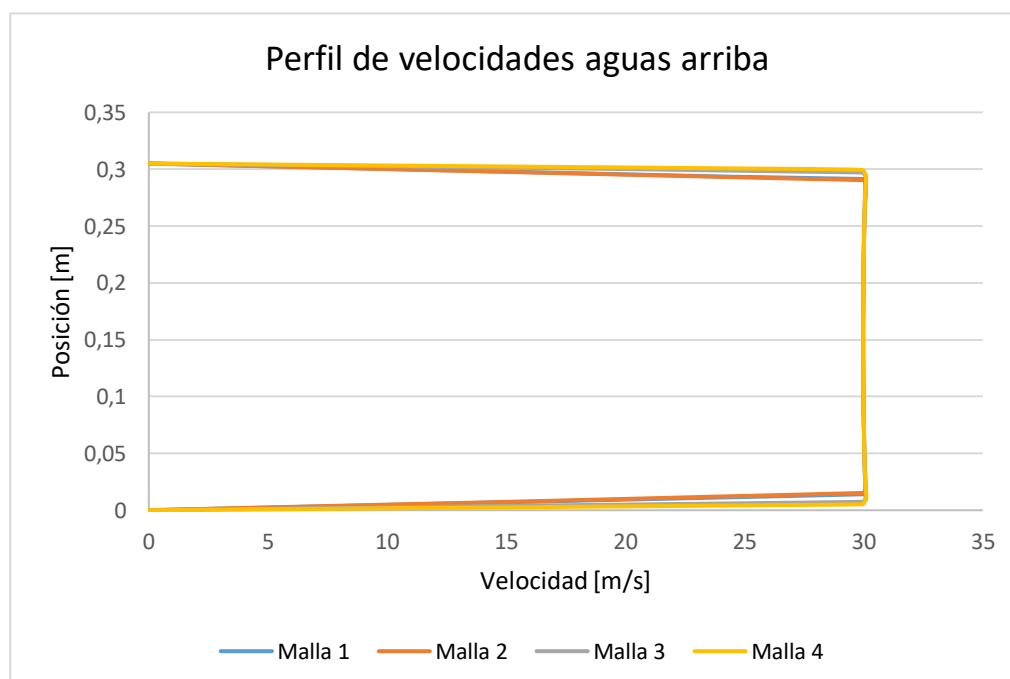


Figura 83. Perfiles de velocidad aguas arriba de las diferentes mallas de la geometría con soportes.

En el gráfico comparativo de la Figura 83 se puede observar un comportamiento homogéneo por parte de todas las mallas. A simple vista se puede observar un pequeño desfase de la malla 2 en la dimensión de la capa limite, siendo esta más amplia. Para el resto del perfil este es prácticamente idéntico al resto adquiriendo una velocidad de 30 m/s tal y como se estableció inicialmente.

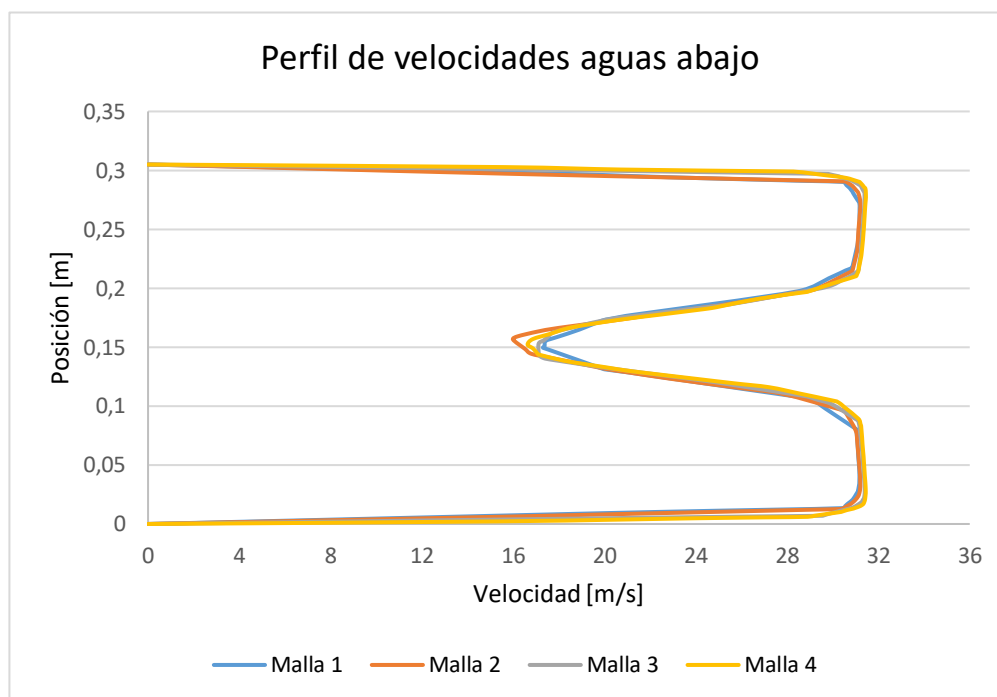


Figura 84. Perfiles de velocidad aguas abajo de las diferentes mallas de la geometría con soportes.

En el gráfico de la Figura 84 se observan más diferencias entre las mallas, pero no son muy relevantes. Podemos ver como en el trayecto de la capa limite hay más diferencia entre las mallas que en el perfil aguas arriba y siguen por todo el perfil. En el centro se puede ver como las 4 mallas ofrecen valores diferentes pero muy próximos entre ellos.

Si comparamos este gráfico con el de la geometría sin soportes, podemos ver como los soportes influyen considerablemente en la velocidad del fluido, ya que encontramos una diferencia en el centro de 2,5 m/s en los resultados de las mallas 4.

5.6.3.3. Variación de las velocidades

A continuación, se comentarán los resultados obtenidos del tercer apartado de simulaciones donde se varia la velocidad de ensayo.

| Prueba | Velocidad (m/s) | Reynolds | Fuerza (N) | C _D Pared |
|--------|--------------------|----------|---------------|-------------------------|
| 1 | 5 | 17013 | 0,0382 | 1,2720 |
| 2 | 10 | 34027 | 0,1522 | 1,2656 |
| 3 | 15 | 51041 | 0,3422 | 1,2648 |
| 4 | 20 | 68055 | 0,6081 | 1,2646 |
| 5 | 25 | 85069 | 0,9504 | 1,2645 |
| 6 | 30 | 102083 | 1,3683 | 1,2642 |
| 7 | 35 | 119097 | 1,8618 | 1,2638 |

Tabla 12. Resultados de las simulaciones a diferentes velocidades.

En la Tabla 12 podemos observar los resultados obtenidos de la fuerza y el coeficiente de arrastre sobre la placa plana. Se puede observar como la fuerza va aumentando de manera cuadrática a medida que lo hace la velocidad, ya que estos dos son proporcionales. En el gráfico de la Figura 85 se puede observar como la curva adquiere una forma cuadrática.

En cuanto al coeficiente de arrastre, podemos ver como cada vez va disminuyendo poco a poco a medida que aumenta la velocidad. Vemos como la variación del coeficiente entre velocidades es cada vez menor, por lo que significa que este va adquiriendo un valor constante tal y como se comentó en la parte teórica.

En el gráfico de la Figura 88 podemos ver una comparación del valor del coeficiente de arrastre según la Figura 13 (Bibliografía) y los valores obtenidos en las simulaciones. Se puede observar como estos son muy cercanos. Los valores de la bibliográfica, van convergiendo hacia el valor de 1,2 a medida que aumenta el Reynolds, en cambio, la convergencia de las simulaciones es más lenta y según la forma de la curva no converge en 1,2 sino en un valor ligeramente más alto.

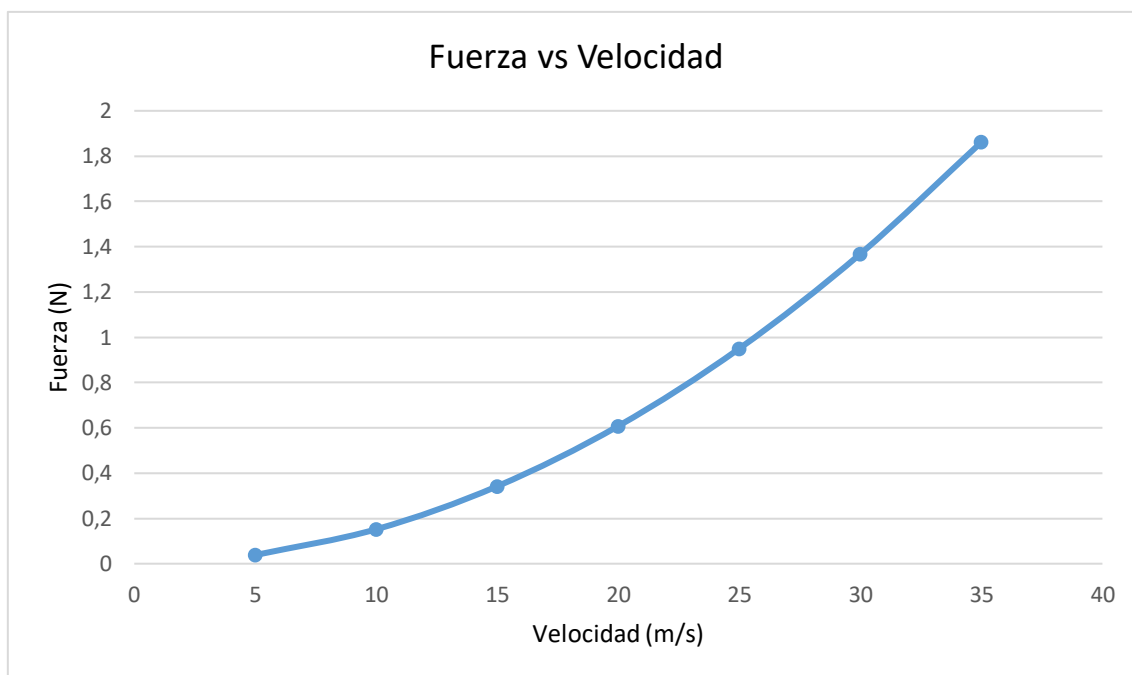


Figura 85. Gráfico fuerza vs velocidad.

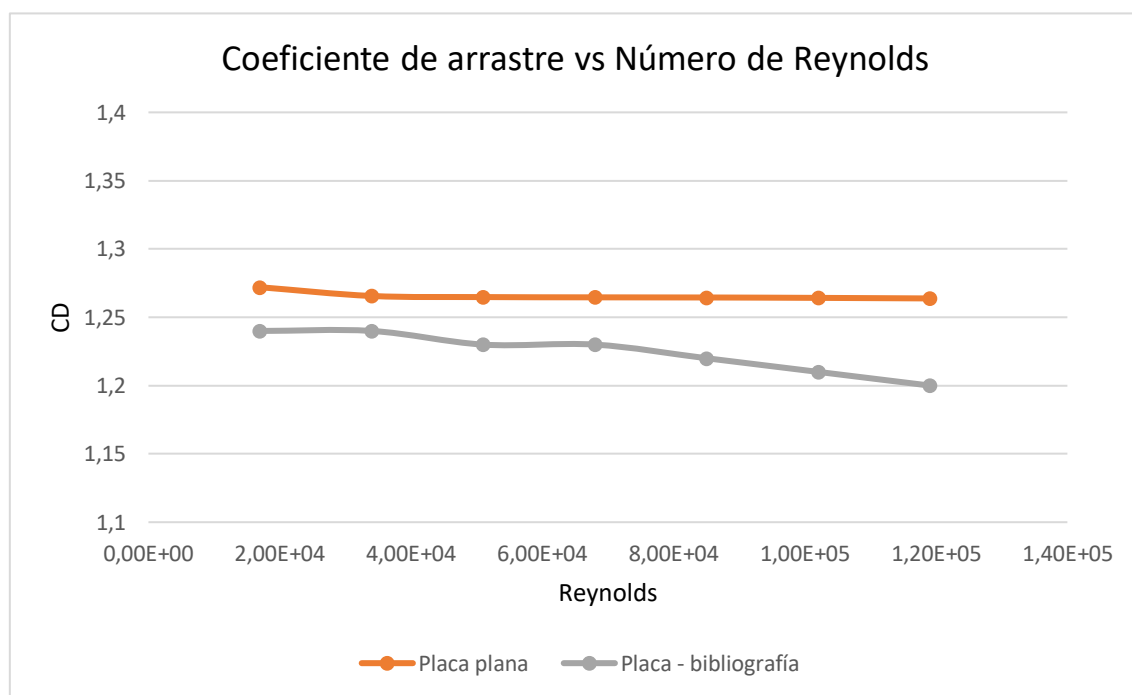


Figura 86. Comparación del coeficiente de arrastre CFD con el de la bibliografía vs Número de Reynolds.

En cuanto a los perfiles de velocidad, en la Figura 87 están representados los perfiles de velocidad aguas arriba. Como podemos ver, todos adquieren una forma idéntica y no presentan ningún comportamiento anómalo.

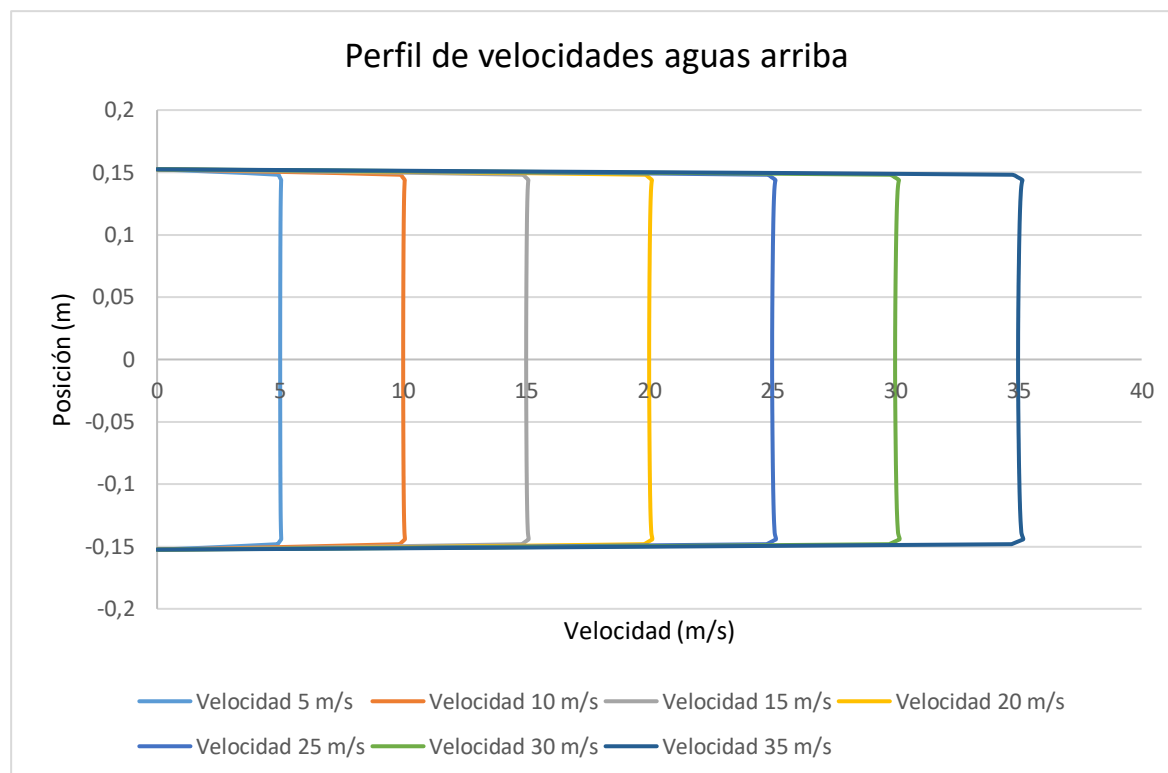


Figura 87. Perfiles de velocidad aguas arriba a varias velocidades.

En el gráfico de la Figura 88, están representados los perfiles aguas abajo. Se puede observar como a velocidades bajas, la estela de déficit de velocidad que se forma es menor y menos puntiaguda. A medida que aumenta la velocidad la estela es más grande y el déficit de velocidad también, llegando a superar los 10 m/s de velocidad de diferencia en el centro respecto la velocidad inicial. Este fenómeno es debido a que una vez el flujo choca contra la placa, la velocidad de este disminuye y cuando este se desprende por los laterales y vuelve circular en el sentido correcto la velocidad es muy baja. Cuando la velocidad inicial es baja, al fluido le es fácil volver a adquirir dicha velocidad en poco recorrido, pero cuando la velocidad es alta, como en el caso de 30 o 35 m/s, necesita mucho más recorrido para volver al estado inicial.

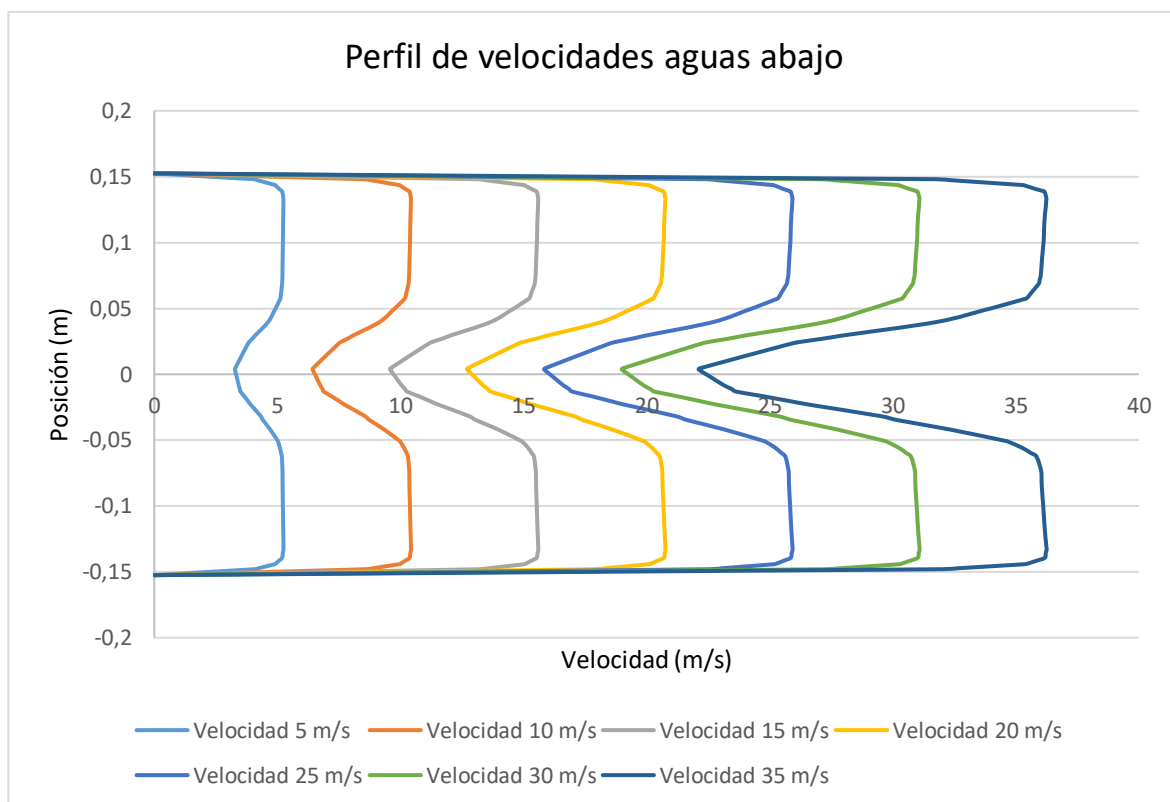


Figura 88. Perfiles de velocidad aguas abajo a varias velocidades.

6. Resultados finales

A continuación, se compararán los resultados finales obtenidos de ambas partes del trabajo; experimental y computacional.

Perfiles de Velocidad

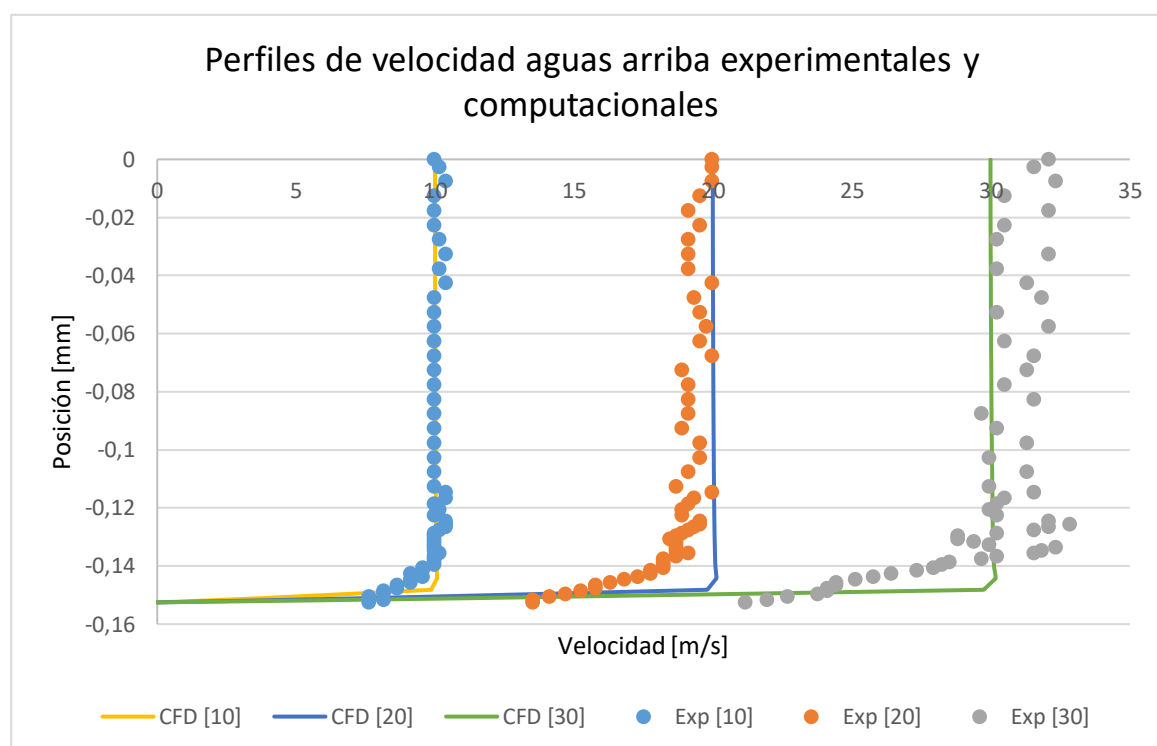


Figura 89. Comparación de los perfiles aguas arriba experimentales y computacionales a diferentes velocidades.

En el gráfico de la Figura 89 están representados los perfiles de velocidad aguas arriba a tres velocidades diferentes, obtenidos de manera experimental y computacional.

A primera vista se puede ver como a medida que aumenta la velocidad hay más discrepancia entre los valores obtenidos. Esto es debido a la turbulencia del flujo que genera un comportamiento caótico y esto se ve mucho más reflejado en la parte experimental. A la velocidad de 10 m/s, ambos perfiles son casi idénticos, ya que el fluido es muy lento y tiene un comportamiento laminar. A 30 m/s el flujo es totalmente turbulento y se puede ver claramente como los valores fluctúan y no siguen un perfil recto. Otra diferencia es el tamaño de la capa límite, en las pruebas CFD el tamaño de la capa límite es inferior a las pruebas experimentales.

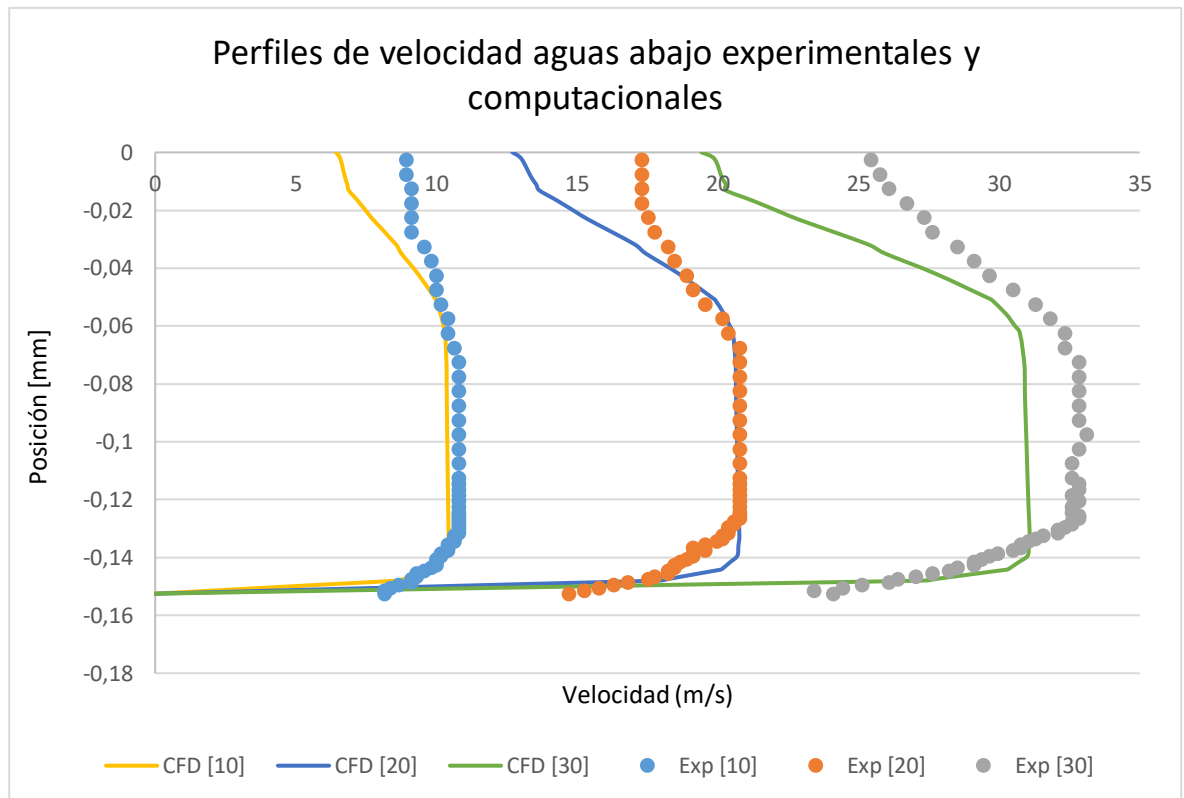


Figura 90. Comparación de los perfiles aguas abajo experimentales y computacionales a diferentes velocidades.

En la Figura 90 referente a los perfiles de velocidad aguas abajo, podemos observar el mismo comportamiento.

Por un lado, a bajas velocidades el perfil de velocidades es muy parecido, sin embargo, a altas velocidades se encuentran diferencias considerables. En cuanto a la capa límite, las pruebas CFD siguen ofreciendo un menor tamaño en comparación a las pruebas experimentales.

Por otro lado, el déficit de velocidad generado por el cuerpo es muy diferente. En las pruebas experimentales podemos observar un déficit de velocidad menor en todos los perfiles, en cambio, en las pruebas CFD el déficit es superior habiendo así una diferencia de alrededor del 20%.

Fuerzas y Coeficiente de arrastre

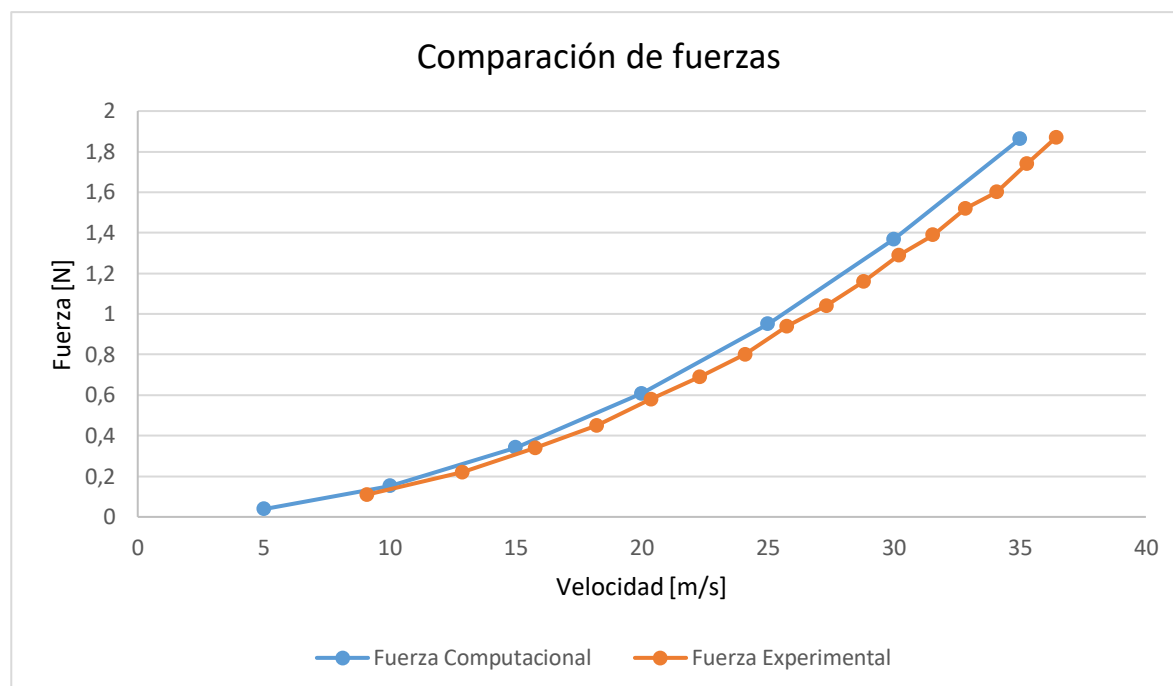


Figura 91. Comparación de las fuerzas obtenidas experimentalmente y por CFD.

En la Figura 91 se han comparado las fuerzas que se generan sobre la placa plana. Podemos observar como son muy próximas, con una curva muy parecida y valores muy próximos. La diferencia máxima que se presenta en dichas fuerzas es de 6,45% respecto la fuerza obtenida mediante CFD.

Según la tendencia que adquieren los resultados, podríamos predecir que a medida que aumenta la velocidad el error iría incrementando, debido a la turbulencia generada y la dificultad que presenta la recogida de medidas precisas en los ensayos experimentales.

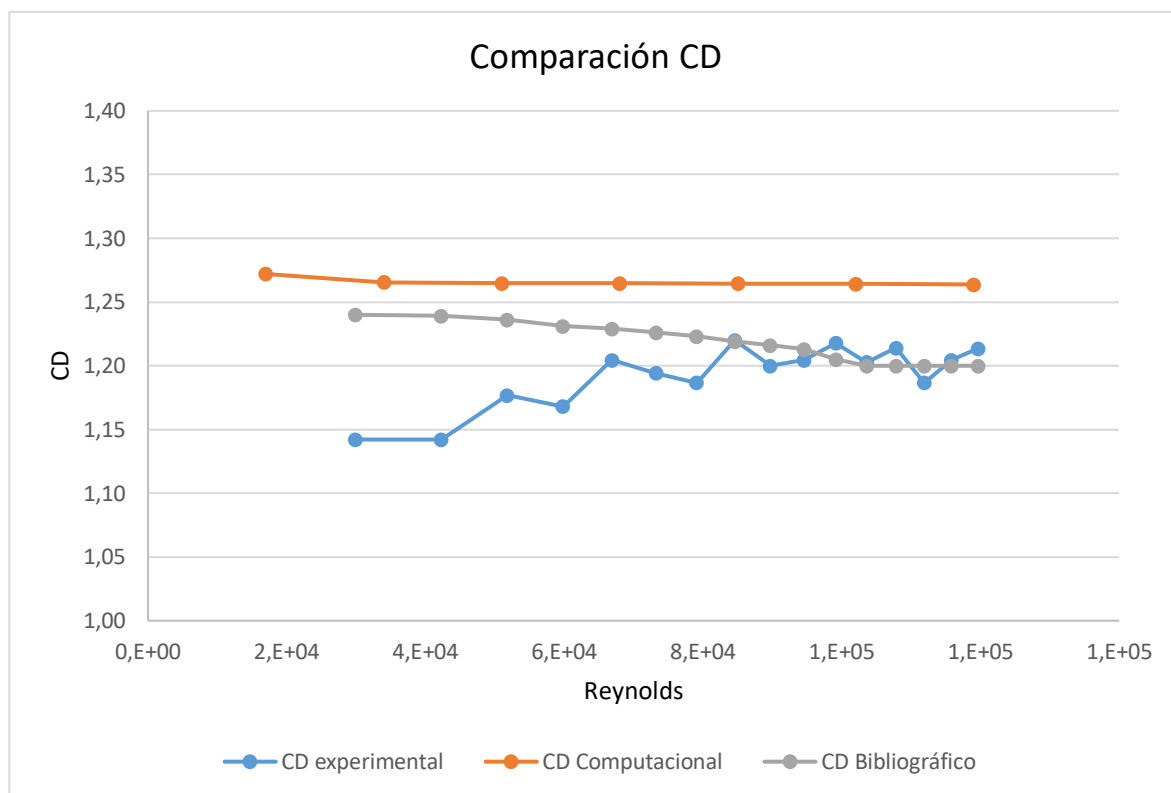


Figura 92. Comparación del coeficiente de arrastre.

En el gráfico de la Figura 92 encontramos una comparación global de los coeficientes de arrastre obtenidos.

Podemos observar como a números de Reynolds bajos los valores bibliográficos se asemejan a los valores computacionales, sin embargo, a números de Reynolds altos los valores experimentales presentan una mayor similitud.

En cuanto al valor experimental, podemos predecir que, si se realizarán más pruebas a mayor velocidad, el valor bibliográfico y experimental acabarían convergiendo en un mismo valor.

Como ya se comentó en el apartado de *Resultados CFD*, el coeficiente de arrastre converge en un valor superior al bibliográfico, esto puede ser causado por la elección del modelo de turbulencia.

Entre los resultados experimentales y computacionales encontramos una diferencia de 4% considerando así una diferencia muy baja y aceptable.

Conclusiones

Durante el desarrollo de este proyecto se ha expuesto el comportamiento de un flujo de aire sobre una placa plana perpendicular al flujo en un túnel de viento. Ha sido fundamental entender con claridad los fenómenos y conceptos teóricos que se desarrollan en la cámara de trabajo durante el transcurso del flujo en el túnel de viento.

Dividiendo el proyecto en dos partes, experimental y computacional, se han realizados varios ensayos. Por un lado, en la primera parte se han realizado varios ensayos para obtener los perfiles de velocidad aguas arriba y aguas bajo para diferentes velocidades. Posteriormente se han obtenido las fuerzas que actúan sobre la placa y se han calculado los coeficientes de arrastre.

Por otro lado, la parte de Dinámica de Fluidos Computacional se ha desarrollado en profundidad y ha adquirido mayor importancia en el proyecto, ocupando una mayor extensión y un mayor tiempo de análisis y simulación. Se han simulado dos geometrías diferentes con varias mallas, variando tanto los regímenes de flujo como los saltos de tiempo. También se han llevado a cabo varias simulaciones variando la velocidad de ensayo.

Como consecuencia de lo expuesto anteriormente se han obtenido los resultados de la Tabla C. 1.

| Configuración | F_D Placa plana (N) | F_D Dummy (N) | F_D Total (N) | C_D |
|------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|--------|
| Experimental | 1,89 | 0,6 | 1,29 | 1,2177 |
| Geometría sin soportes (CFD) | 1,36 | / | 1,37 | 1,2642 |
| Geometría con soportes (CFD) | 1,84 | 0,47 | 1,36 | 1,2604 |

Tabla C. 1. Resultados de fuerzas y coeficientes de arrastre a 30 m/s.

Podemos observar en la Tabla C. 1 los principales resultados de los ensayos realizados. Podemos concluir que los resultados obtenidos han sido satisfactorios debido a su gran similitud entre ellos. Entre el valor experimental y los valores de CFD del coeficiente de arrastre existe una diferencia de 3,68% respecto la geometría sin soportes y de 3,39% respecto la geometría con soportes, siendo estas muy bajas. De esta tabla también podemos concluir que el efecto de los soportes no genera gran alteración de los resultados, habiendo así una diferencia de milésimas entre ellos.

Aunque los valores obtenidos son muy gratificantes y totalmente coincidentes y concordantes, hace falta destacar algunos detalles a tener en cuenta y mejorar en un futuro.

En cuanto a los valores experimentales, los valores de fuerza y coeficiente son muy parecidos tanto a los bibliográficos como los computacionales, sin embargo, en los perfiles de velocidad se encuentran bastantes diferencias como ya se comentó en el apartado *Resultados finales*. Estas variaciones podrían ser debido a las imperfecciones que se encuentran en el panel de abeja que hay en la salida de la tobera y justo en la entrada de la cámara de ensayo que generarían perturbaciones y consecuentemente variaciones en el perfil (Figura C. 1).



Figura C. 1. Imperfecciones en el panel de abeja

También, se podrían haber realizado más ensayos experimentales con la finalidad de verificar y aumentar la precisión y veracidad de los resultados obtenidos, minimizando el error humano y los factores externos que varían en cada ensayo.

En la parte computacional, los valores convergen en un resultado ligeramente más alto de lo esperado. Esto podría ser consecuencia del modelo turbulento utilizado, ya que este podría no adaptarse completamente a nuestras condiciones de trabajo. Para ello se tendrían que haber estudiado varios modelos turbulentos y realizar simulaciones con ellos para poder determinar cuál es el que se ajusta mejor a los resultados experimentales.

En cuanto al estudio de mallas, se ha comprobado la importancia de la creación de una malla optima y de un estudio de convergencia, afectando directamente a los resultados finales obtenidos.

Dando una visión global del proyecto, se han presentado y comentado varias gráficas durante el transcurso del trabajo que demuestran un desarrollo del proyecto de manera profesional y cuidadoso, cuidando los pequeños detalles y adaptándose a las nuevas necesidades que han ido surgiendo, adquiriendo nuevo conocimiento para resolver dichas necesidades, obteniendo así un trabajo de fin de grado de calidad.

Presupuesto y Análisis Económico

Seguidamente se presentará el presupuesto y el análisis económico de este proyecto. Se dividirá en dos partes, una referente a los costes materiales (Tabla P. 1) y otra a los costes de mano de obra (Tabla P. 2). Finalmente se realizará un resumen con el coste total (Tabla P. 3).

Costes de materiales

| Material | Precio hora (€/h) | Horas totales (h) | Precio total (€) |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| Ordenador | 0,2 | 420 | 90,00 |
| Paquete Microsoft Office (3 meses) | - | - | 69,00 |
| Licencia AutoCAD Inventor | 0,48 | 8 | 3,84 |
| Licencia ANSYS | 5,13 | 250 | 1282,50 |
| Total costes de materiales | | | 1445,34 |

Tabla P. 1. Costes materiales.

Costes de personal

| Servicio | Precio hora (€/h) | Horas totales (h) | Precio total (€) |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| Creación de la geometría | 30 | 8 | 240,00 |
| Desarrollo del proyecto | 30 | 100 | 3000,00 |
| Presentación de resultados | 30 | 70 | 2100,00 |
| Técnico de Laboratorio | 30 | 6 | 180,00 |
| Total costes de personal | | | 5520,00 |

Tabla P. 2. Costes mano de obra.

| Resumen Total | Total (€) |
|----------------------|----------------|
| Total | 6965,34 |
| 21% IVA | 1462,72 |
| Total con IVA | 8428,06 |

Tabla P. 3. Resumen de costes

Una vez realizado el análisis económico podemos concluir que, del apartado de costes de materiales, la licencia de ANSYS es el producto que más ha incrementado el coste. Esto es debido a que el programa ANSYS es un software de simulación ingenieril muy costoso y el coste de su licencia es superior a los 30000,00 € anuales.

En el apartado de coste de personal, el desarrollo y la presentación del proyecto ha supuesto una gran labor y un gran coste, tanto económico como temporal.

Consecuentemente, el presupuesto de este proyecto se eleva a los 8428,06 €, IVA incluido.

Bibliografía

- [1] AMAYA CARIAS, Omri Alberto & Vladimir Betancourt Mendoza, Ivan, 2016. Acondicionamiento de un Túnel de Viento para pruebas aerodinámicas y prácticas de laboratorio en la UNAH. En: Revista de Ciencias Espaciales. Volumen 9. Honduras., no. 1, pp. 244-263
- [2] ÇENGEL, Yunus A. & CIMBALA, John M, 2006. *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. México: Mc Grau Hill. ISBN 970-10-5612-4
- [3] DE LAS HERAS, Salvador, 2012. "Generación y transporte de vorticidad". En: *Mecánica de fluidos en ingeniería*. Barcelona: Iniciativa Digital Politècnica. Pp. 87-90.
- [4] Departamento de Mecánica de Fluidos, 2019. *Manual Túnel de Viento*.
- [5] TecQuipment Ltd, 2011. *AF109 Three-dimensional Drag Models User Guide*.
- [6] TecQuipment Ltd, 2018. *Subsonic Wind Tunnel 305 mm*.
- [7] Aqua Pro Omnibus, 2018. Reynolds y la Capa Límite. En: *Aqua Pro Omnibus* [en línea]. Disponible en : <https://aquaproomnibus.blogspot.com/2018/09/reynolds-y-la-capa-limite.html> [consulta: abril 2020]
- [8] GNU Free Documentantion License, 2011. SST k-omega model. En: *CFD Online* [en línea]. Disponible en: https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model [consulta: mayo 2020]
- [9] Gobierno de Aragón, 2016. Sistemas hidráulicos. En: *Plataforma e-ducativa aragonesa* [en línea]. Disponible en:
<http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4918/html/index.html>
[consulta: marzo 2020]
- [10] HALL, Nancy, 2015. Shape Effects on Drag. En: *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* [en línea]. Disponible en: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/shaped.html> [consulta: abril 2020]
- [11] MEDRANO ALATORRE, Diego I. *Mecánica de fluidos. Teoría de la capa limite. Sustentación y arrastre*. [en línea]. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos82/teoria-capa-limite-sustentacion-arrastre/teoria-capa-limite-sustentacion-arrastre.shtml> [consulta : abril 2020]

- [12] MUÑOZ MEJÍAS, Alberto, 2012. *Diseño y análisis computacional para túnel de viento de baja velocidad*. Proyecto de fin de grado. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid [consulta: abril 2020]. Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/15901/pfc_alberto_munoz_mejias_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [13] PINO, Ángel, 2012. La capa límite y los flujos laminar y turbulento en un Fórmula 1. En: *F1 al día* [en línea]. Disponible en: <https://www.f1aldia.com/16286/capa-limite-flujos-laminar-turbulento-formula-1/> [consulta: abril 2020]
- [14] RICHMOND, Gustavo, 2019. *Modelos de turbulencia introductorio* [en línea]. Costa Rica: Costa Rican Institute of Technology (ITCR) [consulta: mayo 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/335611158_Modelos_de_turbulencia_introductorio
- [15] SÁNCHEZ MOSQUETE, Jorge, 2016. El único túnel de viento del mundo cerrado de doble cámara de ensayo se encuentra en la Universidad Europea de Madrid. En: *MOSingenieros* [en línea]. Disponible en: <http://www.mosingenieros.com/2016/07/unico-tunel-viento-del-mundo-cerrado-doble-camara-uem.html> [consulta: abril 2020]
- [16] SCOTT, Jeff, 2005. Drag of Cylinders & Cones. En: *Aerospaceweb* [en línea]. Disponible en: <http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/q0231.shtml> [consulta: abril 2020]
- [17] Túnel aerodinámico – Definición - Significado. En: *MotorGiga* [en línea]. Disponible en: <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/tunel-aerodinamico-definicion-significado/gmx-niv15-con195825.htm> [consulta: abril 2020]
- [18] Turbulencia. Conceptos básicos sobre Dinámica Computacional de Fluidos. En: *Simulaciones y proyectos* [en línea]. Disponible en: <https://www.simulacionesyproyectos.com/cfd-101/turbulencia/> [consulta: mayo 2020]
- [19] 2010. Túneles de viento. En: *F1 al día* [en línea]. Disponible en: <https://www.f1aldia.com/10650/tuneles-de-viento-i/> [consulta: abril 2020]
- [20] 2012. Ecuaciones de Navier-Stokes. Fenómenos Turbulentos. *Biblioteca de Ingeniería. Universidad de Sevilla* [en línea]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapitulo+2.pdf> [consulta: abril 2020]
- [21] 2014. Coeficiente de arrastre. En: *Wikipedia* [en línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_arrastre [consulta: marzo 2020]

[22] 2014. Sustentación. En: *Wikipedia* [en línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Sustentaci%C3%B3n> [consulta: marzo 2020]

Anexo A

En el anexo A están expuestos los valores numéricos obtenidos de los ensayos experimentales realizados en el laboratorio y que han sido utilizados para la creación de los gráficos del apartado *Resultados experimentales*.

A1. Tablas de velocidades

Velocidad inicial: 10 m/s

| Aguas arriba | | | | | Aguas abajo | | | |
|--------------|-------------------------|-----------------|----------------|------------|-------------|-------------------------|----------------|------------|
| y (mm) | Δp (mm.c.a.) | Δp (Pa) | y real (mm) | c (m/s) | y (mm) | Δp (mm.c.a.) | y real (mm) | c (m/s) |
| 0 | 3,5 | 42 | 1 | 7,621 | 0 | 4 | 2 | 8,148 |
| 1 | 4 | 43 | 2 | 8,148 | 1 | 4 | 3 | 8,148 |
| 2 | 3,5 | 42 | 3 | 7,621 | 2 | 4,2 | 4 | 8,349 |
| 3 | 4 | 46 | 4 | 8,148 | 3 | 4,5 | 5 | 8,642 |
| 4 | 4 | 48 | 5 | 8,148 | 4 | 5 | 6 | 9,109 |
| 5 | 4,5 | 48 | 6 | 8,642 | 5 | 5 | 7 | 9,109 |
| 6 | 4,5 | 52 | 7 | 8,642 | 6 | 5,2 | 8 | 9,290 |
| 7 | 5 | 53 | 8 | 9,109 | 7 | 5,2 | 9 | 9,290 |
| 8 | 5 | 56 | 9 | 9,109 | 8 | 5,5 | 10 | 9,554 |
| 9 | 5,5 | 58 | 10 | 9,554 | 9 | 5,8 | 11 | 9,811 |
| 10 | 5 | 58 | 11 | 9,109 | 10 | 6 | 12 | 9,979 |
| 11 | 5,5 | 62 | 12 | 9,554 | 11 | 6 | 13 | 9,979 |
| 12 | 5,5 | 63 | 13 | 9,554 | 12 | 6 | 14 | 9,979 |
| 13 | 6 | 65 | 14 | 9,979 | 13 | 6,2 | 15 | 10,144 |
| 14 | 6 | 66 | 15 | 9,979 | 14 | 6,2 | 16 | 10,144 |
| 15 | 6 | 65 | 16 | 9,979 | 15 | 6,5 | 17 | 10,386 |
| 16 | 6 | 67 | 17 | 9,979 | 16 | 6,5 | 18 | 10,386 |
| 17 | 6,2 | 70 | 18 | 10,144 | 17 | 6,5 | 19 | 10,386 |
| 18 | 6 | 67 | 19 | 9,979 | 18 | 6,8 | 20 | 10,623 |
| 19 | 6 | 69 | 20 | 9,979 | 19 | 6,8 | 21 | 10,623 |
| 20 | 6 | 69 | 21 | 9,979 | 20 | 6,8 | 22 | 10,623 |
| 21 | 6 | 67 | 22 | 9,979 | 21 | 7 | 23 | 10,778 |
| 22 | 6 | 68 | 23 | 9,979 | 22 | 7 | 24 | 10,778 |
| 23 | 6 | 68 | 24 | 9,979 | 23 | 7 | 25 | 10,778 |
| 24 | 6 | 68 | 25 | 9,979 | 24 | 7 | 26 | 10,778 |
| 25 | 6,2 | 70 | 26 | 10,144 | 25 | 7 | 27 | 10,778 |
| 26 | 6,5 | 73 | 27 | 10,386 | 26 | 7 | 28 | 10,778 |
| 27 | 6,5 | 74 | 28 | 10,386 | 27 | 7 | 29 | 10,778 |

| | | | | | | | | |
|-----|-----|----|-----|--------|-----|-----|-----|--------|
| 28 | 6,5 | 70 | 29 | 10,386 | 28 | 7 | 30 | 10,778 |
| 30 | 6 | 70 | 31 | 9,979 | 30 | 7 | 32 | 10,778 |
| 32 | 6,2 | 70 | 33 | 10,144 | 32 | 7 | 34 | 10,778 |
| 34 | 6 | 70 | 35 | 9,979 | 34 | 7 | 36 | 10,778 |
| 36 | 6,5 | 74 | 37 | 10,386 | 36 | 7 | 38 | 10,778 |
| 38 | 6,5 | 72 | 39 | 10,386 | 38 | 7 | 40 | 10,778 |
| 40 | 6 | 70 | 41 | 9,979 | 40 | 7 | 42 | 10,778 |
| 45 | 6 | 70 | 46 | 9,979 | 45 | 7 | 47 | 10,778 |
| 50 | 6 | 69 | 51 | 9,979 | 50 | 7 | 52 | 10,778 |
| 55 | 6 | 68 | 56 | 9,979 | 55 | 7 | 57 | 10,778 |
| 60 | 6 | 69 | 61 | 9,979 | 60 | 7 | 62 | 10,778 |
| 65 | 6 | 68 | 66 | 9,979 | 65 | 7 | 67 | 10,778 |
| 70 | 6 | 68 | 71 | 9,979 | 70 | 7 | 72 | 10,778 |
| 75 | 6 | 69 | 76 | 9,979 | 75 | 7 | 77 | 10,778 |
| 80 | 6 | 70 | 81 | 9,979 | 80 | 7 | 82 | 10,778 |
| 85 | 6 | 69 | 86 | 9,979 | 85 | 6,8 | 87 | 10,623 |
| 90 | 6 | 70 | 91 | 9,979 | 90 | 6,5 | 92 | 10,386 |
| 95 | 6 | 69 | 96 | 9,979 | 95 | 6,5 | 97 | 10,386 |
| 100 | 6 | 70 | 101 | 9,979 | 100 | 6,2 | 102 | 10,144 |
| 105 | 6 | 69 | 106 | 9,979 | 105 | 6 | 107 | 9,979 |
| 110 | 6,5 | 74 | 111 | 10,386 | 110 | 6 | 112 | 9,979 |
| 115 | 6,2 | 71 | 116 | 10,144 | 115 | 5,8 | 117 | 9,811 |
| 120 | 6,5 | 75 | 121 | 10,386 | 120 | 5,5 | 122 | 9,554 |
| 125 | 6,2 | 71 | 126 | 10,144 | 125 | 5 | 127 | 9,109 |
| 130 | 6 | 67 | 131 | 9,979 | 130 | 5 | 132 | 9,109 |
| 135 | 6 | 70 | 136 | 9,979 | 135 | 5 | 137 | 9,109 |
| 140 | 6 | 70 | 141 | 9,979 | 140 | 5 | 142 | 9,109 |
| 145 | 6,5 | 74 | 146 | 10,386 | 145 | 4,8 | 147 | 8,925 |
| 150 | 6,2 | 72 | 151 | 10,144 | 150 | 4,8 | 152 | 8,925 |
| 155 | 6 | 69 | 156 | 9,979 | 155 | 4,8 | 157 | 8,925 |

Tabla A. 1. Velocidades aguas arriba y aguas abajo a 10 m/s

Velocidad inicial: 20 m/s

| Aguas arriba | | | | | Aguas abajo | | | |
|--------------|-------------------------|-----------------|----------------|------------|-------------|-------------------------|----------------|------------|
| y (mm) | Δp (mm.c.a.) | Δp (Pa) | y real (mm) | c (m/s) | y (mm) | Δp (mm.c.a.) | y real (mm) | c (m/s) |
| 0 | 11 | 110 | 1 | 13,511 | 0 | 13 | 2 | 14,688 |
| 1 | 11 | 110 | 2 | 13,511 | 1 | 14 | 3 | 15,243 |
| 2 | 12 | 115 | 3 | 14,112 | 2 | 15 | 4 | 15,778 |
| 3 | 13 | 123 | 4 | 14,688 | 3 | 16 | 5 | 16,295 |
| 4 | 14 | 130 | 5 | 15,243 | 4 | 17 | 6 | 16,797 |
| 5 | 15 | 142 | 6 | 15,778 | 5 | 18,5 | 7 | 17,522 |
| 6 | 15 | 140 | 7 | 15,778 | 6 | 19 | 8 | 17,757 |
| 7 | 16 | 150 | 8 | 16,295 | 7 | 20 | 9 | 18,219 |
| 8 | 17 | 165 | 9 | 16,797 | 8 | 20 | 10 | 18,219 |
| 9 | 18 | 176 | 10 | 17,284 | 9 | 20,5 | 11 | 18,445 |
| 10 | 19 | 184 | 11 | 17,757 | 10 | 20,5 | 12 | 18,445 |
| 11 | 19 | 190 | 12 | 17,757 | 11 | 21 | 13 | 18,669 |
| 12 | 20 | 195 | 13 | 18,219 | 12 | 21,5 | 14 | 18,890 |
| 13 | 20 | 200 | 14 | 18,219 | 13 | 22 | 15 | 19,108 |
| 14 | 20 | 200 | 15 | 18,219 | 14 | 22 | 16 | 19,108 |
| 15 | 20 | 200 | 16 | 18,219 | 15 | 23 | 17 | 19,537 |
| 16 | 21 | 207 | 17 | 18,669 | 16 | 22 | 18 | 19,108 |
| 17 | 22 | 215 | 18 | 19,108 | 17 | 23 | 19 | 19,537 |
| 18 | 21 | 208 | 19 | 18,669 | 18 | 24 | 20 | 19,958 |
| 19 | 21 | 210 | 20 | 18,669 | 19 | 24,5 | 21 | 20,164 |
| 20 | 21 | 211 | 21 | 18,669 | 20 | 24,5 | 22 | 20,164 |
| 21 | 21 | 211 | 22 | 18,669 | 21 | 25 | 23 | 20,369 |
| 22 | 20,5 | 207 | 23 | 18,445 | 22 | 25 | 24 | 20,369 |
| 23 | 21 | 209 | 24 | 18,669 | 23 | 25 | 25 | 20,369 |
| 24 | 21,5 | 212 | 25 | 18,890 | 24 | 25,5 | 26 | 20,572 |
| 25 | 22 | 220 | 26 | 19,108 | 25 | 25,5 | 27 | 20,572 |
| 26 | 22,5 | 225 | 27 | 19,324 | 26 | 26 | 28 | 20,773 |
| 27 | 23 | 226 | 28 | 19,537 | 27 | 26 | 29 | 20,773 |
| 28 | 23 | 225 | 29 | 19,537 | 28 | 26 | 30 | 20,773 |
| 30 | 21,5 | 211 | 31 | 18,890 | 30 | 26 | 32 | 20,773 |
| 32 | 21,5 | 213 | 33 | 18,890 | 32 | 26 | 34 | 20,773 |
| 34 | 22 | 224 | 35 | 19,108 | 34 | 26 | 36 | 20,773 |
| 36 | 22,5 | 225 | 37 | 19,324 | 36 | 26 | 38 | 20,773 |
| 38 | 24 | 235 | 39 | 19,958 | 38 | 26 | 40 | 20,773 |
| 40 | 21 | 217 | 41 | 18,669 | 40 | 26 | 42 | 20,773 |
| 45 | 22 | 222 | 46 | 19,108 | 45 | 26 | 47 | 20,773 |
| 50 | 23 | 225 | 51 | 19,537 | 50 | 26 | 52 | 20,773 |
| 55 | 23 | 223 | 56 | 19,537 | 55 | 26 | 57 | 20,773 |

| | | | | | | | | |
|-----|------|-----|-----|--------|-----|------|-----|--------|
| 60 | 21,5 | 214 | 61 | 18,890 | 60 | 26 | 62 | 20,773 |
| 65 | 22 | 217 | 66 | 19,108 | 65 | 26 | 67 | 20,773 |
| 70 | 22 | 220 | 71 | 19,108 | 70 | 26 | 72 | 20,773 |
| 75 | 22 | 222 | 76 | 19,108 | 75 | 26 | 77 | 20,773 |
| 80 | 21,5 | 216 | 81 | 18,890 | 80 | 26 | 82 | 20,773 |
| 85 | 24 | 232 | 86 | 19,958 | 85 | 26 | 87 | 20,773 |
| 90 | 23 | 226 | 91 | 19,537 | 90 | 25 | 92 | 20,369 |
| 95 | 23,5 | 227 | 96 | 19,749 | 95 | 24,5 | 97 | 20,164 |
| 100 | 23 | 228 | 101 | 19,537 | 100 | 23 | 102 | 19,537 |
| 105 | 22,5 | 224 | 106 | 19,324 | 105 | 22 | 107 | 19,108 |
| 110 | 24 | 238 | 111 | 19,958 | 110 | 21,5 | 112 | 18,890 |
| 115 | 22 | 221 | 116 | 19,108 | 115 | 20,5 | 117 | 18,445 |
| 120 | 22 | 219 | 121 | 19,108 | 120 | 20 | 122 | 18,219 |
| 125 | 22 | 225 | 126 | 19,108 | 125 | 19 | 127 | 17,757 |
| 130 | 23 | 229 | 131 | 19,537 | 130 | 18,5 | 132 | 17,522 |
| 135 | 22 | 218 | 136 | 19,108 | 135 | 18 | 137 | 17,284 |
| 140 | 23 | 230 | 141 | 19,537 | 140 | 18 | 142 | 17,284 |
| 145 | 24 | 238 | 146 | 19,958 | 145 | 18 | 147 | 17,284 |
| 150 | 24 | 238 | 151 | 19,958 | 150 | 18 | 152 | 17,284 |
| 155 | 24 | 238 | 156 | 19,958 | 155 | 18 | 157 | 17,284 |

Tabla A. 2. Velocidades aguas arriba y aguas abajo a 20 m/s

Velocidad inicial: 30 m/s

| Aguas arriba | | | | | Aguas abajo | | | |
|--------------|-------------------------|-----------------|----------------|------------|-------------|-------------------------|----------------|------------|
| y (mm) | Δp (mm.c.a.) | Δp (Pa) | y real (mm) | c (m/s) | y (mm) | Δp (mm.c.a.) | y real (mm) | c (m/s) |
| 0 | 27 | 260 | 1 | 21,168 | 0 | 35 | 2 | 24,101 |
| 1 | 29 | 280 | 2 | 21,938 | 1 | 33 | 3 | 23,402 |
| 2 | 31 | 300 | 3 | 22,682 | 2 | 36 | 4 | 24,443 |
| 3 | 34 | 330 | 4 | 23,754 | 3 | 38 | 5 | 25,113 |
| 4 | 35 | 320 | 5 | 24,101 | 4 | 41 | 6 | 26,085 |
| 5 | 35 | 340 | 6 | 24,101 | 5 | 42 | 7 | 26,401 |
| 6 | 36 | 347 | 7 | 24,443 | 6 | 44 | 8 | 27,023 |
| 7 | 36 | 350 | 8 | 24,443 | 7 | 46 | 9 | 27,630 |
| 8 | 38 | 380 | 9 | 25,113 | 8 | 48 | 10 | 28,224 |
| 9 | 40 | 395 | 10 | 25,765 | 9 | 49 | 11 | 28,517 |
| 10 | 42 | 405 | 11 | 26,401 | 10 | 51 | 12 | 29,093 |
| 11 | 45 | 435 | 12 | 27,328 | 11 | 51 | 13 | 29,093 |
| 12 | 47 | 447 | 13 | 27,929 | 12 | 52 | 14 | 29,377 |
| 13 | 48 | 458 | 14 | 28,224 | 13 | 53 | 15 | 29,658 |
| 14 | 49 | 480 | 15 | 28,517 | 14 | 54 | 16 | 29,936 |
| 15 | 53 | 490 | 16 | 29,658 | 15 | 56 | 17 | 30,486 |
| 16 | 55 | 540 | 17 | 30,212 | 16 | 57 | 18 | 30,757 |
| 17 | 60 | 580 | 18 | 31,556 | 17 | 57 | 19 | 30,757 |
| 18 | 61 | 600 | 19 | 31,818 | 18 | 58 | 20 | 31,025 |
| 19 | 63 | 615 | 20 | 32,335 | 19 | 59 | 21 | 31,292 |
| 20 | 54 | 520 | 21 | 29,936 | 20 | 60 | 22 | 31,556 |
| 21 | 52 | 500 | 22 | 29,377 | 21 | 62 | 23 | 32,077 |
| 22 | 50 | 490 | 23 | 28,806 | 22 | 62 | 24 | 32,077 |
| 23 | 50 | 490 | 24 | 28,806 | 23 | 63 | 25 | 32,335 |
| 24 | 55 | 535 | 25 | 30,212 | 24 | 64 | 26 | 32,591 |
| 25 | 60 | 570 | 26 | 31,556 | 25 | 64 | 27 | 32,591 |
| 26 | 62 | 580 | 27 | 32,077 | 26 | 65 | 28 | 32,844 |
| 27 | 65 | 630 | 28 | 32,844 | 27 | 65 | 29 | 32,844 |
| 28 | 62 | 600 | 29 | 32,077 | 28 | 64 | 30 | 32,591 |
| 30 | 55 | 530 | 31 | 30,212 | 30 | 64 | 32 | 32,591 |
| 32 | 54 | 515 | 33 | 29,936 | 32 | 65 | 34 | 32,844 |
| 34 | 55 | 520 | 35 | 30,212 | 34 | 64 | 36 | 32,591 |
| 36 | 56 | 530 | 37 | 30,486 | 36 | 65 | 38 | 32,844 |
| 38 | 60 | 580 | 39 | 31,556 | 38 | 65 | 40 | 32,844 |
| 40 | 54 | 520 | 41 | 29,936 | 40 | 64 | 42 | 32,591 |
| 45 | 59 | 575 | 46 | 31,292 | 45 | 64 | 47 | 32,591 |
| 50 | 54 | 510 | 51 | 29,936 | 50 | 65 | 52 | 32,844 |
| 55 | 59 | 575 | 56 | 31,292 | 55 | 66 | 57 | 33,096 |

| | | | | | | | | |
|-----|----|-----|-----|--------|-----|----|-----|--------|
| 60 | 55 | 540 | 61 | 30,212 | 60 | 65 | 62 | 32,844 |
| 65 | 53 | 515 | 66 | 29,658 | 65 | 65 | 67 | 32,844 |
| 70 | 60 | 570 | 71 | 31,556 | 70 | 65 | 72 | 32,844 |
| 75 | 56 | 540 | 76 | 30,486 | 75 | 65 | 77 | 32,844 |
| 80 | 59 | 540 | 81 | 31,292 | 80 | 65 | 82 | 32,844 |
| 85 | 60 | 580 | 86 | 31,556 | 85 | 63 | 87 | 32,335 |
| 90 | 56 | 530 | 91 | 30,486 | 90 | 63 | 92 | 32,335 |
| 95 | 62 | 600 | 96 | 32,077 | 95 | 61 | 97 | 31,818 |
| 100 | 55 | 530 | 101 | 30,212 | 100 | 59 | 102 | 31,292 |
| 105 | 61 | 590 | 106 | 31,818 | 105 | 56 | 107 | 30,486 |
| 110 | 59 | 575 | 111 | 31,292 | 110 | 53 | 112 | 29,658 |
| 115 | 55 | 535 | 116 | 30,212 | 115 | 51 | 117 | 29,093 |
| 120 | 62 | 595 | 121 | 32,077 | 120 | 49 | 122 | 28,517 |
| 125 | 55 | 530 | 126 | 30,212 | 125 | 46 | 127 | 27,630 |
| 130 | 56 | 550 | 131 | 30,486 | 130 | 45 | 132 | 27,328 |
| 135 | 62 | 600 | 136 | 32,077 | 135 | 43 | 137 | 26,714 |
| 140 | 56 | 540 | 141 | 30,486 | 140 | 41 | 142 | 26,085 |
| 145 | 63 | 605 | 146 | 32,335 | 145 | 40 | 147 | 25,765 |
| 150 | 60 | 570 | 151 | 31,556 | 150 | 39 | 152 | 25,441 |
| 155 | 62 | 600 | 156 | 32,077 | 155 | 39 | 157 | 25,441 |

Tabla A. 3. Velocidades aguas arriba y aguas abajo a 30 m/s

A2. Tabla de fuerzas y coeficientes

| Pitot | Velocidad | F modelo | F dummy |
|---------------------------|-------------------|----------|---------|
| $\Delta p(\text{mm.c.a})$ | $c \text{ (m/s)}$ | F (N) | F (N) |
| 5 | 9,1094 | 0,14 | 0,03 |
| 10 | 12,8826 | 0,31 | 0,09 |
| 15 | 15,7779 | 0,49 | 0,15 |
| 20 | 18,2188 | 0,65 | 0,20 |
| 25 | 20,3692 | 0,84 | 0,26 |
| 30 | 22,3133 | 1,01 | 0,32 |
| 35 | 24,1012 | 1,18 | 0,38 |
| 40 | 25,7652 | 1,37 | 0,43 |
| 45 | 27,3281 | 1,54 | 0,50 |
| 50 | 28,8064 | 1,72 | 0,56 |
| 55 | 30,2124 | 1,89 | 0,60 |
| 60 | 31,5558 | 2,05 | 0,66 |
| 65 | 32,8443 | 2,24 | 0,72 |
| 70 | 34,0842 | 2,39 | 0,79 |
| 75 | 35,2805 | 2,58 | 0,84 |
| 80 | 36,4375 | 2,77 | 0,90 |

Tabla A. 4. Fuerzas resultantes para la placa plana y el cilindro dummy.

| Placa plana | | | | Cilindro dummy | |
|-------------|----------|----------|---------|----------------|----------|
| F total | Drag | Reynolds | Teórico | Drag | Reynolds |
| F (N) | Cd | Re | Cd | Cd | Re |
| 0,11 | 1,142152 | 29914,2 | 1,240 | 0,451 | 7179,4 |
| 0,22 | 1,142152 | 42305,1 | 1,239 | 0,677 | 10153,2 |
| 0,34 | 1,176762 | 51813,0 | 1,236 | 0,752 | 12435,1 |
| 0,45 | 1,168110 | 59828,4 | 1,231 | 0,752 | 14358,8 |
| 0,58 | 1,204451 | 66890,2 | 1,229 | 0,782 | 16053,7 |
| 0,69 | 1,194068 | 73274,6 | 1,226 | 0,802 | 17585,9 |
| 0,80 | 1,186651 | 79145,6 | 1,223 | 0,816 | 18994,9 |
| 0,94 | 1,220026 | 84610,2 | 1,219 | 0,808 | 20306,4 |
| 1,04 | 1,199836 | 89742,7 | 1,216 | 0,835 | 21538,2 |
| 1,16 | 1,204451 | 94597,1 | 1,213 | 0,842 | 22703,3 |
| 1,29 | 1,217666 | 99214,2 | 1,205 | 0,820 | 23811,4 |
| 1,39 | 1,202720 | 103625,9 | 1,200 | 0,827 | 24870,2 |
| 1,52 | 1,214035 | 107857,3 | 1,200 | 0,833 | 25885,7 |
| 1,60 | 1,186651 | 111928,8 | 1,200 | 0,848 | 26862,9 |
| 1,74 | 1,204451 | 115857,3 | 1,200 | 0,842 | 27805,7 |
| 1,87 | 1,213536 | 119656,9 | 1,200 | 0,846 | 28717,7 |

Tabla A. 5. Coeficientes de arrastre resultantes para la placa y el cilindro dummy.

